

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra měřící a řídicí techniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Bezdrátové zařízení pro určení polohy
Wireles Device for Detection of Position

Prohlášení

Souhlasím s tím, že s výsledky mé bakalářské práce může být naloženo podle uvážení vedoucího bakalářské práce a vedoucího katedry. V případě publikace budu uveden jako autor. Prohlašuji, že na celé bakalářské práci jsem pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

V Ostravě 2010

.....

David Vybíral

Poděkování

Chtěl bych poděkovat především vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinu Augustýnkovi, za pomoc, náměty a veškerý čas, který mi věnoval. Další poděkování patří моým rodičům za podporu během tvorby této bakalářské práce.

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a realizací bezdrátového zařízení sloužícího ke snímání polohy. Součástí této práce je rozbor problematiky způsobu měření, přehled principu měření akcelerometrů a bezdrátový přenos dat z čidla do PC. Dále pak se práce zaměřuje na výběr vhodných součástí, návrh plošných spojů, naprogramování aplikace v programu Matlab, realizaci simulátoru pohybu, detekci polohy hrací kostky pro demonstraci měření a sestavením laboratorní úlohy do předmětu Biotelemetrie.

Klíčová slova

Akcelerometr, I2C sběrnice, Bluetooth, RS232

Annotation

Work deals with the design and implementation of wireless equipment to position sensing. Part of this work is to analyze the issue of how to measure, an overview of the principle of measuring accelerometers and wireless transmission of data from sensors to the PC. Then focuses on the selection of appropriate components, PCB design, programming application in the program Matlab, implementation of motion simulator and demonstration the measuring of detection of position dice and create laboratory measure for Biotelemetry.

Keywords

Accelerometer, I2C bus, Bluetooth, RS232

Seznam použitých symbolů a zkratek

MEMS	Micro electro mechanil systém - mikro elektro mechanické systémy
RS232	Sériová linka
USB	Universal seriál bus - univerzální sériová sběrnice
TTL	Transistor transistor logic - tranzistorově tranzistorová logika
EDR	Enhance data rate - rozšířený datový přenos
ICP	Integrated circuit piezoeletric - integrované piezoelektrické obvody
ASIC	Application specific integrated circuit - specifický aplikační integrovaný okruh
I2C	Inter intergrated circuit - multimasterová počítačová sériová sběrnice
MMA	Micro Machined Accelrometr - Mikro obráběné akcelerometry
SPI	Seriál peripheral interface - sériově periferní rozhraní
SDA	Seriál data line - vedení seriál data
SCL	Seriál clock line - vedení hodin obvodu
ST	Start condition - počáteční podmínky
AK	Acknowledge – potvrzení
NAK	Non acknowledge – nepotrzení
UART	Universal asynchronous reciver transmitter - univerzální asynchroní přijímač vysílač

Obsah

1	Úvod.....	6
2	Komunikace	7
2.1	Sériová linka RS232.....	8
2.1.1	Konektory pro RS232.....	8
2.1.2	Způsoby zapojení	9
2.1.3	Zabezpečení přenosu dat	10
2.1.4	Délka vedení.....	10
2.1.5	Připojení RS232 na TTL	10
2.2	Bluetooth	11
2.2.1	Historie Bluetooth	11
2.2.2	Technické parametry	11
2.2.3	Komunikace	12
2.2.4	Topologie	12
3	Akcelerometry	13
3.1	Přehled zrychlení.....	13
3.2	Přehled akcelerometrů.....	13
3.2.1	Piezoelektrické akcelerometry	14
3.2.2	Piezorezistivní akcelerometry	15
3.2.3	Tepelné akcelerometry	16
3.2.4	Akcelerometry s proměnnou kapacitou.....	17
4	Návrh a realizace měřícího řetězce	19
4.1	Akcelerometr MMA 7455	19
4.1.1	Zapojení sběrnice I2C	19
4.1.2	Průběh adresování	20
4.2	Převodník UART na I2C.....	20
4.2.1	Příklad komunikace.....	21
4.3	Bluetooth modul Bluemod + B20/AI.....	22

5	Návrh softwarové aplikace.....	24
5.1	Vývojový diagram.....	24
5.1.1	Symboly vývojového diagramu.....	24
5.1.2	Vývojové diagramy programu.....	25
5.2	Popis programu	28
6	Testování.....	32
7	Závěr	37

1 Úvod

V dnešním světě nás obklopuje stále více moderních technologií. Tyto technologie mají za úkol prospívat člověku. Mezi takovou technologií patří také akcelerometry, které dokážou detekovat zrychlení, vibrace případně náklony. Toho se využívá například pro sledování seizmické aktivity, navigaci nebo ke stabilizaci obrazu u fotoaparátu.

Cílem této práce je vytvořit bezdrátové zařízení pro snímání polohy. Jádrem celého zařízení bude 3-osý miniaturní akcelerometr vyroben MEMS technologií. Akcelerometr bude ovládán z PC-stanice za pomoci bluetooth a grafického prostředí vytvořeného v programu Matlab. Bezdrátová komunikace bude zprostředkována podle zadání technologií Bluetooth. Pro otestování funkce akcelerometru bude vytvořen simulátor pohybu a bezdrátová detekce polohy kostky. Zařízení bude měřit zrychlení a náklony. Na závěr bude vytvořena laboratorní úloha do předmětu Biotelemetri.

2 Komunikace

Data mohou být přenášena mezi dvěma zařízeními nebo větším počtem zařízení, které jsou připojeny ke společné sběrnici. Za sběrnici se označuje skupina řídicích, adresových a datových vodičů. Jejím účelem je zajistit přenos dat a řídicích povelů. Přenos dat po sběrnici probíhá vždy podle daných pravidel, které se podobají pravidlům mezilidské komunikace. Souhrn těchto pravidel se nazývá protokol.

Přenos dat může být rozdělen:

- Z hlediska přenosu bitu
 - Sériový
 - Paralelní
- Z hlediska synchronizace dat
 - Synchronní
 - Asynchronní

Během sériového přenosu se data přenášejí jedinou přenosovou cestou bit po bitu. Při paralelním přenosu se současně přenáší celé slovo, které se většinou skládá z 8 nebo 16 bitů.

Na první pohled se zdá, že paralelní přenos dat je rychlejší, avšak ne vždy to platí. Nesmíme zapomenout, že jednotlivé vodiče ve vícežilovém kabelu mají určitou vzájemnou kapacitu a indukčnost. Při rychlém paralelním přenosu dat na větší vzdálenosti tak dochází ke vzájemnému rušení a ovlivnění jednotlivých signálů na datové sběrnici. Pokud takto vzniklé rušivé impulsy dosáhnou překlápečí úrovně, začnou vznikat chyby. Takový přenos je limitován součinem délky kabelu a rychlosti přenosu. Při delším kabelu je po vyslání dat na sběrnici potřeba počkat, než rušivé impulsy odezní a teprve potom data číst. Tím pádem klesá i rychlost přenosu.

Při sériovém přenosu nedochází k vzájemnému ovlivňování jednotlivých bitů, přenos dat může být rychlejší. Proto při větších vzdálenostech mezi přijímačem a vysílačem je sériový přenos rychlejší. Sériový přenos je především úspornější z hlediska počtu vodičů oproti paralelnímu přenosu, pro který je potřeba vícežilový vodič. Pro sériový přenos stačí jednodušší konektory, minimalizují se problémy vzniklé nedokonalým připojením, což zaručuje větší spolehlivost.

Synchronní přenos dat znamená, že přijímač a vysílač jsou řízeny zdrojem stejného hodinového signálu. Pokud se jedná o obvody v jednom přístroji, nebo o přístroje pevně spolu spojené, je to optimální způsob přenosu.

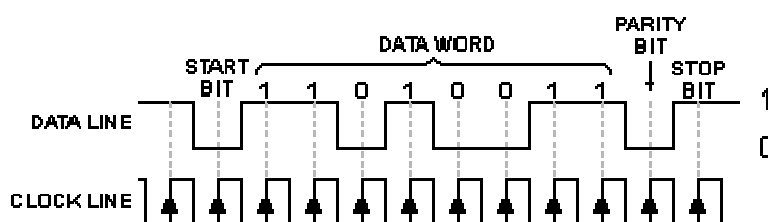
Při asynchroním přenosu tomu tak není. Synchronizace přijímače a vysílače se stále obnovuje při přenosu každého slova. Takový přenos je pomalejší, ale mohou tak spolupracovat kterákoliv zařízení používající stejný přenosový protokol. Při tomto typu přenosu musí být pouze zajištěno normalizované propojení obou zařízení. Rychlost přenosu dat je proměnná.

[2]

2.1 Sériová linka RS232

Sběrnice RS-232, se používá jako komunikační rozhraní osobních počítačů a další elektroniky. V současné době se v oblasti osobních počítačů od používání sériového rozhraní RS232 již téměř definitivně ustoupilo a bylo nahrazeno výkonnějším USB. Nicméně v průmyslu je tento standard a jeho modifikace, velice rozšířen. Na rozdíl od komplexnějšího USB, standard RS232 pouze definuje, jak přenést určitou sekvenci bitů a nezabývá se už vyššími vrstvami komunikace. V referenčním modelu ISO/OSI tak představuje pouze fyzickou vrstvu.

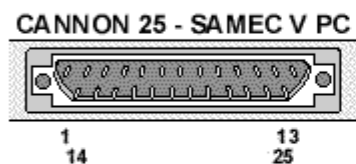
Přenos informací probíhá asynchronně. Data jsou vysílána jako posloupnost bitů, v jednom časovém okamžiku se přenáší vždy jeden bit. Logická 1 odpovídá úrovni -3 až -15 V, logická 0 úrovni +3 až +15 V. Při tomto asynchronním přenosu je nezbytně nutné nastavit shodně přenosovou rychlost, která se volí z řady 110,300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600 nebo 19 200 bit/s. Vysílaný blok dat (Přenosový rámeček) se skládá z 1 start bitu, 5 až 8 datových bitů, maximálně 1 paritního bitu a 1 až dvou stop bitů.



Obr. 2.1: Přenosový rámeček[9]

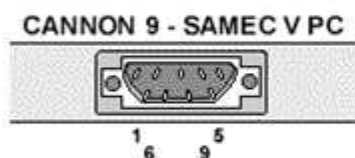
2.1.1 Konektory pro RS232

Pro RS232 existují konektory dvojího druhu, 9 nebo 25 kolíkový konektor. Na straně PC jsou vždy konektory samčí (s kolíky), na připojovacích kabelech jsou konektory samičí (s dutinkami). Umístění jednotlivých signálů na konektoru je přehledně zobrazeno v následujícím obrázku s popisem v tabulce.



Pin	Název	Směr	Popis
1	SHIELD	---	Ochranná zem
2	TXD	->	Vysílaná data
3	RXD	<--	Přijímaná data
4	RTS	->	Požadavek přenosu
5	CTS	<--	Smazání přenosu
6	DSR	<--	Připravenost přijímat data
7	GND	---	Systémová zem
8	CD	<--	Příznak přenosu
9 -19	N/C	---	---
20	DTR	->	Připravenost vysílat data
21	N/C	-	---
22	RI	<--	Kruhový indikátor
23-25	N/C	---	---

Obr. 2.2: Konektor Cannon 25 dnes již minulosti[9]



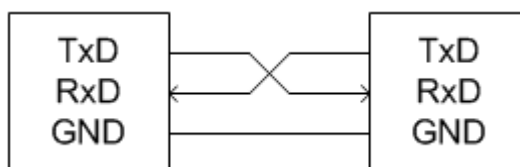
Pin	Název	Směr	Popis
1	CD	<--	Příznak přenosu
2	RXD	<--	Přijímaná data
3	TXD	-->	Vysílaná data
4	DTR	-->	Připravenost vysílat data
5	GND	--	Systémová zem
6	DSR	<--	Připravenost přijímat data
7	RTS	-->	Požadavek přenosu
8	CTS	<--	Smazání přenosu
9	RI	<--	Kruhový indikátor

Obr. 2.3: Konektor Cannon 9[9]

2.1.2 Způsoby zapojení

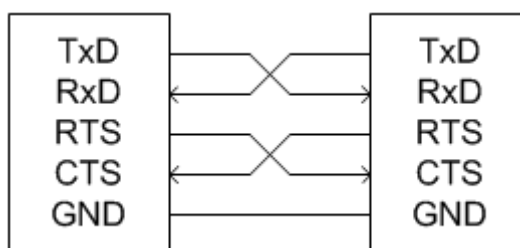
Sériová komunikace probíhá na dvou výstupních a čtyřech vstupních linkách. Vlastní přenos dat na sériovém portu se obvykle uskutečňuje po linkách TxD (Transmit data) a RxD (Receive data). Všechny ostatní linky plní pomocné funkce pro strukturování a řízení přenosu dat.

Nejjednodušší využití této sběrnice je třívodičové zapojení, ve kterém jsou použity pouze datové vodiče a signálová zem (Obr. 2.2). Řízení přenosu dat probíhá programově tzv. handshakingem.



Obr. 2.2: Třívodičové zapojení RS232[2]

Při pětivodičovém zapojení se pro řízení přenosu dat používají místo handshakingu signály RST (Request to send) a CTS (Clear to send), kterými obě zařízení potvrzují připravenost k příjmu dat (Obr. 2.3).



Obr. 2.3: Pětivodičové zapojení RS232[2]

2.1.3 Zabezpečení přenosu dat

Parita je nejjednodušší způsob jak bez nároků na výpočetní výkon zabezpečit přenos dat beze ztrát informací. Ve vysílacím zařízení se sečte počet jedničkových bitů a doplní se paritním bitem tak, aby byla zachována předem dohodnutá podmínka sudého nebo lichého počtu jedničkových bitů.

- **SUDÁ PARITA** – Počet jedničkových bitů + paritní bit = SUDÉ ČÍSLO
- **LICHÁ PARITA** – Počet jedničkových bitů + paritní bit = LICHÉ ČÍSLO
- **SPACE PARITY** – Tzv. nulová parita – paritní bit je vždy v logická 0, používá se například při komunikaci s 7bitového zařízení s 8bitovým, kdy paritní bit nahrazuje tvrdou logickou 0 poslední bit v byte, tím je zachována kompatibilita s 8bitovým přenosem.
- **MARK PARITY** - Paritní bit je nastaven tvrdě na logická 1, při kompenzaci 7bitového provozu je třeba jej na přijímací straně nulovat, jinak není kompatibilní s ASCII.

2.1.4 Délka vedení

Uvádí se jako maximální možná délka vodičů 15 metrů, nebo délka vodiče o kapacitě 2500 pF. To znamená, že při použití kvalitních vodičů lze dodržet standard a při zachování jmenovité kapacity prodloužit vzdálenost až na cca 50 metrů.

Kabel lze také prodlužovat při snížení přenosové rychlosti, protože potom bude přenos odolnější vůči velké kapacitě vedení. Uvedené parametry počítají s přenosovou rychlostí 19 200 bit/s. V tabulce jsou uvedeny různé vzdálenosti kabelu s ohledem na přenosovou rychlost.

Přenosová rychlost [bit/s]	Maximální délka [m]
19 200	15
9 600	150
4 800	300
2 400	900

Obr. 2.4: Přibližná závislost mezi rychlostí přenosu a délkou[9]

2.1.5 Připojení RS232 na TTL

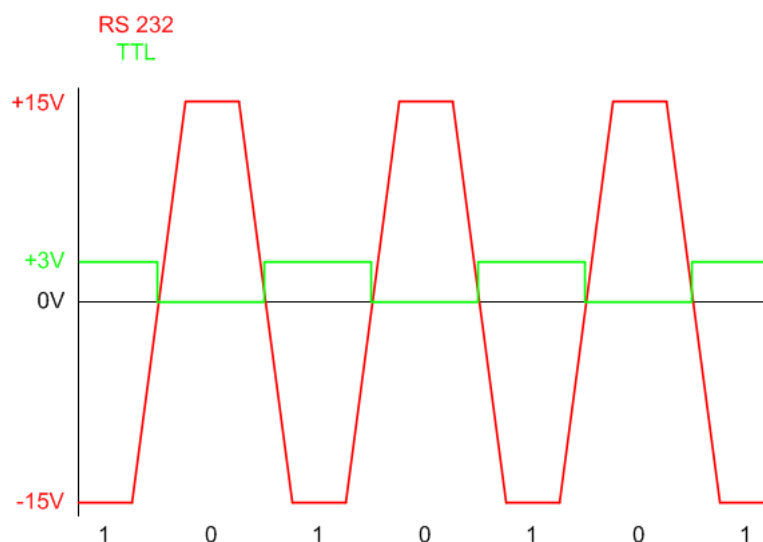
TTL (tranzistorově-tranzistorová logika) standard slouží pro implementaci digitálních integrovaných obvodů. Potřebujeme-li připojit TTL zařízení k PC přes RS232 linku, musíme nejdříve upravit napěťové úrovně signálu.

Obvody TTL používají nejčastěji napájecí napětí 5V, z čehož vyplývá pro logickou 1 napětí přibližně 5V a pro logickou 0 napětí 0V. Napětí 0 V až 0,8 V na vstupu se interpretuje jako logická 0. Napětí 2,0 V až 5,0 V na vstupu se interpretuje jako logická 1. Napětí 0,8 V až 2,0 V leží v tzv. zakázaném pásmu, pro které není funkce obvodu definována.

V současnosti se napěťová hladina používaná pro implementaci digitální logiky snižuje, používá se logika s napájením 3 V, 2,5 V, 1,8 V a 1,2 V. Snižování napěťové hladiny je diktováno požadavky na vyšší integraci a nižší spotřebu na tranzistor u moderních zařízení. Pro nízkonapěťovou logiku bohužel zřejmě neexistuje všeobecně přijímaný standard pro logické úrovně, jak tomu bylo je u 5V TTL.

Jelikož klidový stav je u RS232 reprezentován logickou jedničkou, reprezentovanou záporným napětím. Logická nula je naproti tomu reprezentována napětím kladným. Může napětí v případě vysílače dosahovat minimálně -15 a maximálně $+15$ V, a to by obvody TTL pracující s podstatně nižšími úrovněmi spolehlivě zničilo.

Z tohoto důvodu je nutné použít známý obvod MAX 3232. Má dvojité vysílač a přijímač. Napájen je 3V a k vytvoření vyššího napětí pro RS232 používá nábojovou pumpu, pro kterou jsou určeny i externí kondenzátory.



Obr. 2.5: Napěťová úroveň RS232 a 3V TTL logiky

[1][2][3][9]

2.2 Bluetooth

2.2.1 Historie Bluetooth

Technologii Bluetooth vyvinula švédská firma Ericsson v roce 1998. Jedná se o technologii pro bezdrátový přenos hlasu a dat na krátké vzdálenosti. Hlavní ideou bluetooth bylo vytvořit bezdrátové spojení s minimálními nároky na spotřebu energie. Původně byly její prioritou mobilní aplikace, především mobilní telefony, kde měla nahradit nedostačující infraport. Postupem času se ale rozšířila, a to jak v oblasti telekomunikací, tak osobních počítačů.

První funkční verze měla, označení 1.0. Ve verzi 1.1 byla implementována možnost připojit až 7 přístrojů najednou. Další nástupce byla verze 1.2, která měla vylepšenou detekci přenosových chyb. Aktuální verze 2.1 dokáže měnit rychlost přenosu během komunikace a navíc díky ní došlo k navýšení rychlosti technikou EDR na 2Mb/s. Všechny bluetooth specifikace jsou zpětně kompatibilní.

2.2.2 Technické parametry

Bluetooth komunikuje v bez licenčním pásmu 2,402 GHz – 2,480 GHz, což nám dává k dispozici celkem 79 kanálů, které jsou od sebe vzdáleny 1 MHz. Při komunikaci mezi těmito kanály probíhají neustálé frekvenční skoky (frequency hopping), rychlostí 1600 skoků za sekundu, tato funkce ztěžuje případný odposlech a eliminuje chybu rušení od ostatních zařízení. Maximální přenosová rychlost

hlasu je 64 kb/s, a to v obou směrech (synchronní mód). Data je možné přenášet v asynchronním módu (uplink 721 kb/s, downlink 57,6 kb/s), nebo v synchronním módu (432,6 kb/s) oběma směry. Jde o čisté přenosové rychlosti po započítání potřeby řídicích a opravných protokolů.

Na základě vysílaného výkonu jsou zařízení rozdělena do tří výkonových tříd:

- **Třída 1-** je uzpůsobena pro dlouhý dosah (cca 100m), max. výkon 100mW
- **Třída 2-** vhodná pro běžné aplikace (cca 10m), max. výkon 2,5mW
- **Třída 3-** ideální pro krátký dosah (cca 10cm), max. výkon 1mW

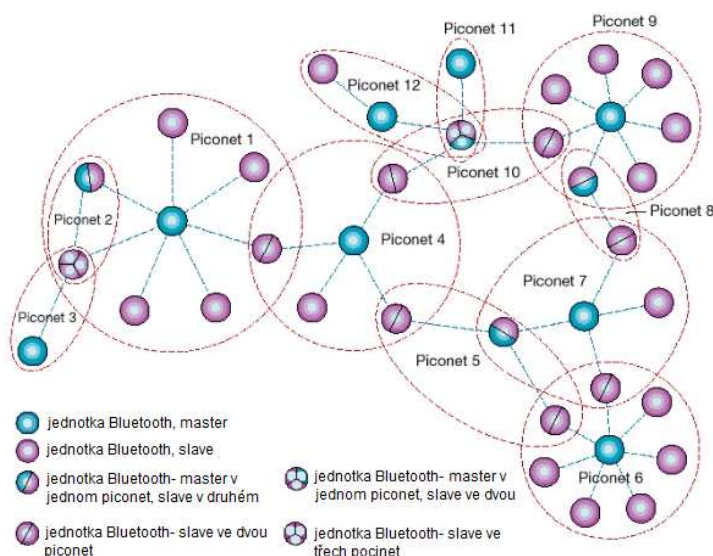
2.2.3 Komunikace

Systém Bluetooth je založen na čipu, který má unikátní identifikační číslo o délce 48bitů. Podle tohoto čísla se čipy mezi sebou poznávají. Zároveň se toto číslo používá k zakódování přenášených informací. Každý čip může fungovat ve třech stavech Master, Slave nebo Master a Slave zároveň. Jakmile se jeden z čipů aktivuje do stavu Master, ostatní čipy v dosahu se automaticky přepnou na stav Slave a jejich řízení se ujme čip v režimu Master. Ten neustále sleduje komunikaci ve svém okolí, v případě zjištění aktivity, začne skenovat na prvních 16 frekvencích. Pokud nedostane žádnou odpověď, pokračuje na dalších 16 frekvencích. Celý proces domluvy trvá zhruba 2,56 sekund.

2.2.4 Topologie

Technologie Bluetooth umožňuje komunikaci buď mezi dvěma zařízeními (typ point to point), nebo jednoho zařízení s několika dalšími (typ point to multipoint). Soustava dvou a více komunikujících zařízení se potom nazývá piconet. V soustavě piconet však může být pouze jedna řídicí jednotka (Master) a ostatní jednotky jsou jí podřízené (Slave), může jich být až 7. Další možností Bluetooth sítí je překrývání jednotlivých piconet sítí. Takovéto uspořádání se nazývá scatternet (rozprostřená síť). Spojení jedné piconet buňky s dalšími je realizováno díky tomu, že jedno zařízení typu Slave může figurovat ve dvou různých piconet sítích, a to jak v roli Slave jednotky, tak Master.

[1][14]



Obr. 2.6: Topologie bluetooth

3 Akcelerometry

Akcelerometr je inteligentní senzor určený pro měření zrychlení, což je charakteristika pohybu, která popisuje, jakým způsobem se mění rychlost tělesa v čase. Zrychlení je vektorová fyzikální veličina, neboť udává jak velikost změny, tak její směr. Na základě těchto poznatku rozlišujeme zrychlení na statické (gravitační) a dynamické (odstředivé).

3.1 Přehled zrychlení

Gravitační zrychlení vyjadřuje intenzitu gravitačního pole v daném místě, ve kterém se projevuje gravitační působení hmotných těles. Vyjadřuje tedy gravitační sílu, kterou toto pole působí na těleso. Teoretická střední hodnota gravitačního zrychlení na povrchu Země je $a_g = 9,823 \text{ m/s}^2$. Tato hodnota vyplývá ze vztahu pro intenzitu gravitačního pole (1) po dosazení hodnot poloměru a hmotnosti Země, za zjednodušení předpokladu, že Země je nehybná, homogenní, dokonalá koule, což je poloměr koule o stejném objemu, jako je skutečný objem Země by tělesa s gravitačním zrychlením padala k Zemi, kdyby se Země neotáčela.

$$a_g = \chi \cdot \frac{M}{R^2} \quad (1)$$

Kde M je hmotnost země $5,9736 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

R je poloměr země 6378137 m

χ je universální gravitační konstanta s hodnotou $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$

Odstředivé zrychlení vzniká působením odstředivé síly. Odstředivá síla je setrvačná síla, která působí na těleso v otáčející se vztažné soustavě. Výpočet odstředivého zrychlení je dle vztahu (2).

$$a_o = \omega \cdot v \quad (2)$$

Kde ω je úhlová rychlost $[\text{rad/s}]$

v je rychlost pohybujícího se tělesa $[\text{m/s}]$

Tíhové zrychlení je zrychlení těles na Zemi, které je výsledkem složení gravitačního zrychlení a odstředivého zrychlení (3), jež vzniká jako důsledek otáčení Země. Jednotkou tíhového zrychlení je m/s^2 . Velikost gravitačního a odstředivého zrychlení není vždy stejná. Závisí na hustotě tělesa a na vzdálenosti od středu tělesa.

$$g = a_g + a_o \quad (3)$$

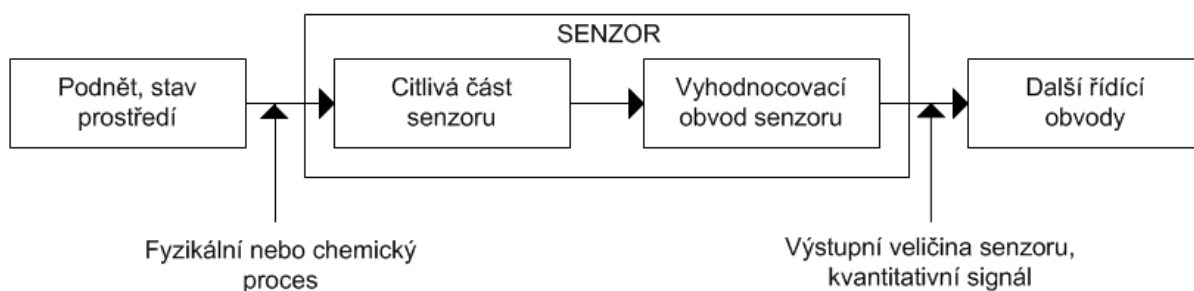
[4][5][6][7][8]

3.2 Přehled akcelerometrů

Od svého vzniku urazily akcelerometry kus cesty. V současnosti se využívají pro měření 4 různé principy, proto můžeme akcelerometry rozdělit na:

- 1) Piezoelektrické
- 2) Piezorezistivní
- 3) Tepelné
- 4) Akcelerometry s proměnnou kapacitou

Aktuálním trendem v jejich vývoji je technologie MEMS (Mikro-elektro-mechanické-systémy). Systém MEMS spočívá v zabudování mechanického subsystému, nutného pro převod fyzikální veličiny na elektrickou a elektronického subsystému zajišťující následné zpracování měřených dat (postprocessing) na jednom čipu. Výhody jsou především v miniaturizaci, nižší spotřebě a potažmo nižších nákladech.

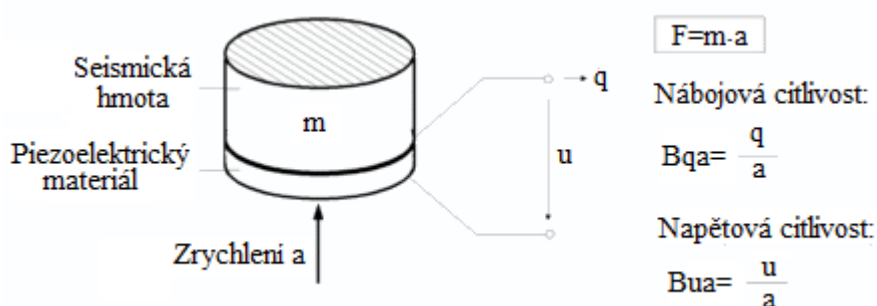


Obr. 3.1: Obecné znázornění funkce senzoru

[10][13]

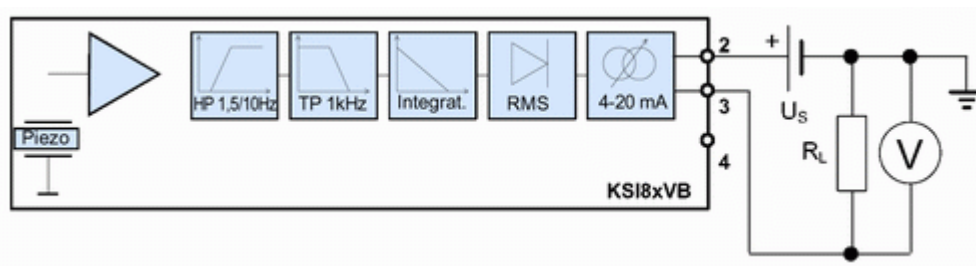
3.2.1 Piezoelektrické akcelerometry

Snímač využívá piezoelektrický jev, při kterém vlivem deformace piezoelektrického materiálu vzniká náboj úměrný velikosti deformace. Základní struktura snímače obsahuje dvě části samotný piezoelektrický materiál a seismickou hmotu. Během měření akcelerometr nejdříve převádí podle druhého Newtonova zákona zrychlení na sílu, která způsobí stlačení (změnu tvaru) piezoelektrické materiálu, tím pádem se uvolní elektrický náboj přímo úměrný působící síle a zároveň zrychlení, za předpokladu, že hmotnost seismické hmoty je konstantní.



Obr. 3.2: Princip piezoelektrického akcelerometru[10]

Vygenerovaný náboj je snímán pomocí dvou elektrod a dále upravován vnitřními integrovanými elektrickými obvody ICP, na jehož výstupu získáme údaj ve formě napěťového signálu. Pro tento typ akcelerometru jsou charakteristické parametry nábojová a napěťová citlivost.



Obr. 3.3: Typické schéma ICP[10]

Existuje více druhů piezoelektrických akcelerometrů. Liší se zejména v konstrukčním provedení, kdy jsou na úkor požadovaných vlastností obětovány jiné vlastnosti. Z toho hlediska akcelerometry dělíme na:

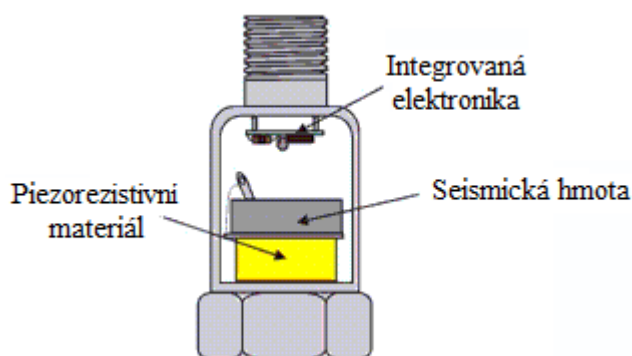
- Smykový – vyznačuje se zvýšenou odolností proti vlivu teploty a parazitním otřesům pouzdra
- Ohybový- velmi citlivý snímač, ideální pro měření nepatrných vibrací
- Kompresní-běžná průmyslová verze

I když dnes akcelerometry podléhají neustále miniaturizaci, mají piezoelektrické akcelerometry pořád, co nabídnou. Vzhledem k jejich relativně snadné výrobě jsou oblíbené a hojně používány hlavně v průmyslových aplikacích.

[10]

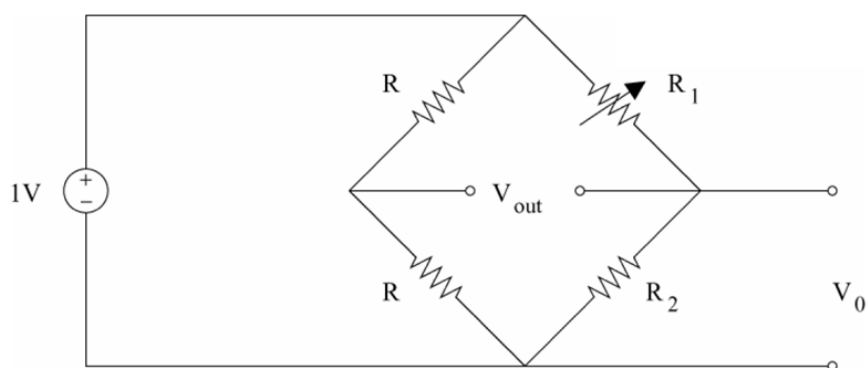
3.2.2 Piezorezistivní akcelerometry

Patří momentálně mezi nejrozšířenější akcelerometr díky příznivému poměru cena/výkon. Je založen na podobném principu snímání zrychlení v závislosti na působící síle jako předchozí akcelerometry, s tím rozdílem, že piezoelektrický materiál vystřídal piezorezistivní materiál.



Obr. 3.4: Jednoduchý piezorezistivní akcelerometr[11]

Vlivem mechanického namáhání při působení zrychlení na seismickou hmotu, dochází k deformaci piezoelektrického materiálu, což vyvolá změnu odpor. Hodnota změny odporu se vyhodnocuje pomocí známého Wheatstonova můstku. Výstupní napětí Wheatstonova můstku je přímo úměrné zrychlení.



Obr. 3.5: Wheatstonuv můstek[11]

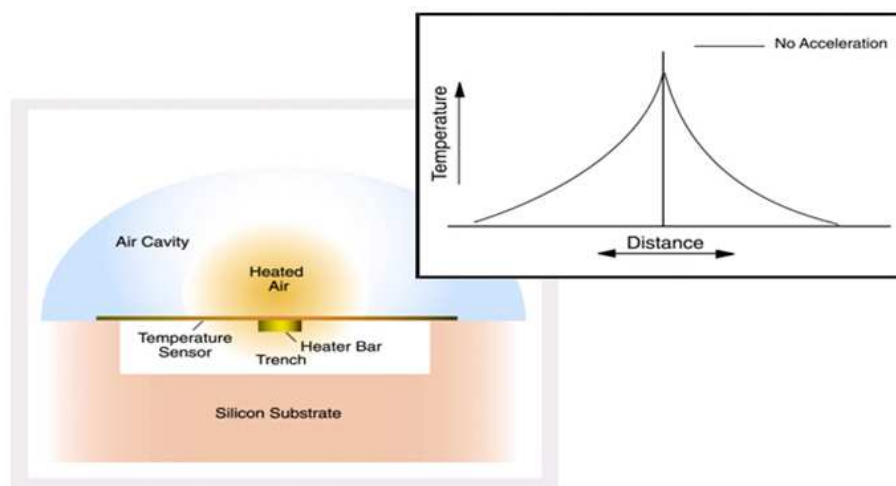
Slabinou piezorezistivních akcelerometrů je křížová citlivost. Projevuje se při měření jedné osy parazitním snímáním ostatních neměřených os, což má za následek zkreslení výsledku. Uvádí se poměrem citlivosti v neměřených směrech ke směru měřenému. Křížové citlivosti u těchto snímačů nelze zabránit, ale je možné ji omezit správnou konstrukcí.

Navíc jsou tyto akcelerometry vybaveny samotestováním za účelem kontroly případné nefunkčnosti, protože v některých aplikacích se uplatňují spíše výjimečně a je důležité aby, v okamžiku potřeby zareagovali bez váhání. Testování je realizováno automaticky přiložením napětí na elektrody, seismická hmota se snadno vychýlí a na základě výstupního signálu se provede kalibrace citlivosti a teplotní kompenzace. Výhodou je velká citlivost. Nevýhodou značné ovlivnění výsledku měření na teplotě.

[11]

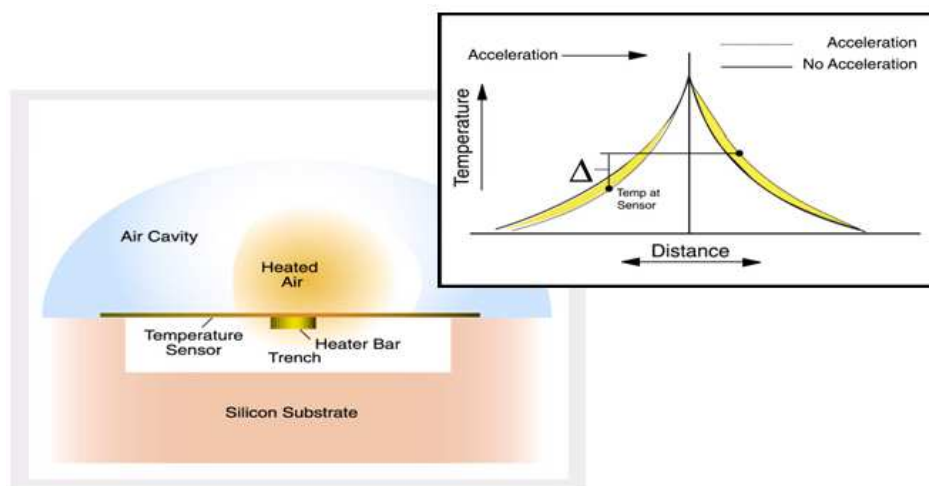
3.2.3 Tepelné akcelerometry

Objeví se teprve nedávno, využívají základní fyzikální princip proudění tepla v plynu. Jak vyplývá z Obr. 3.6. Jejich základnu tvoří křemíkový substrát, který má uprostřed prohlubeninu (Trench) pro topné tělísko (Heater bar), kolem něho jsou potom plošně rozmístěny snímače tepla s pravidelným rozestupem a celá soustava je zapouzdřena do vzduchové komůrky (Air cavity).



Obr. 3.6: Klidový stav[12]

Topné tělísko ohřívá vzdušný oblak v okolí zdroje tepla konstantní teplotou a senzory snímají jeho rozložení. Pokud budeme na akcelerometr působit zrychlením, zaznamenáme ho pomocí změny rozložení tepla.



Obr. 3.7: Vychýlení do strany[12]

Výhodou těchto akcelerometrů je extrémní vydrž, protože nemají mechanickou část, zvládnou bez problému změřit zrychlení až 50 000g aniž by došlo k jejich zničení. Slabší stránkou akcelerometru je podpora pouze 2D měření (dáno principem) a velká teplotní citlivost, většina výrobců tento problém odstranila buď externím nebo přímo na čipu integrovaným teplotním čidlem (termistorem), které slouží ke kompenzaci teplotních výkyvů.

[12]

3.2.4 Akcelerometry s proměnnou kapacitou

Kapacitní akcelerometry jsou založeny na proměnné kapacitě 3 elektrodového vzduchového kondenzátoru, protože se jedná o pasivní snímače, musíme nejdříve přivést napětí, abychom mohli měřit výstupní zrychlení. Využívají nelineární závislost kapacity na vzdálenosti elektrod kondenzátoru d podle vztahu.

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d}$$

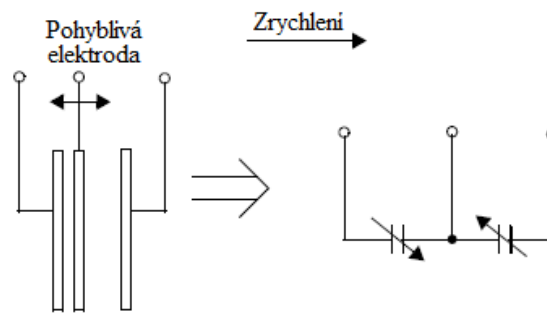
Kde C je velikost kapacity kondenzátoru

ε je permitivita dielektrika mezi elektrodami

S je velikost plochy deskového kondenzátoru

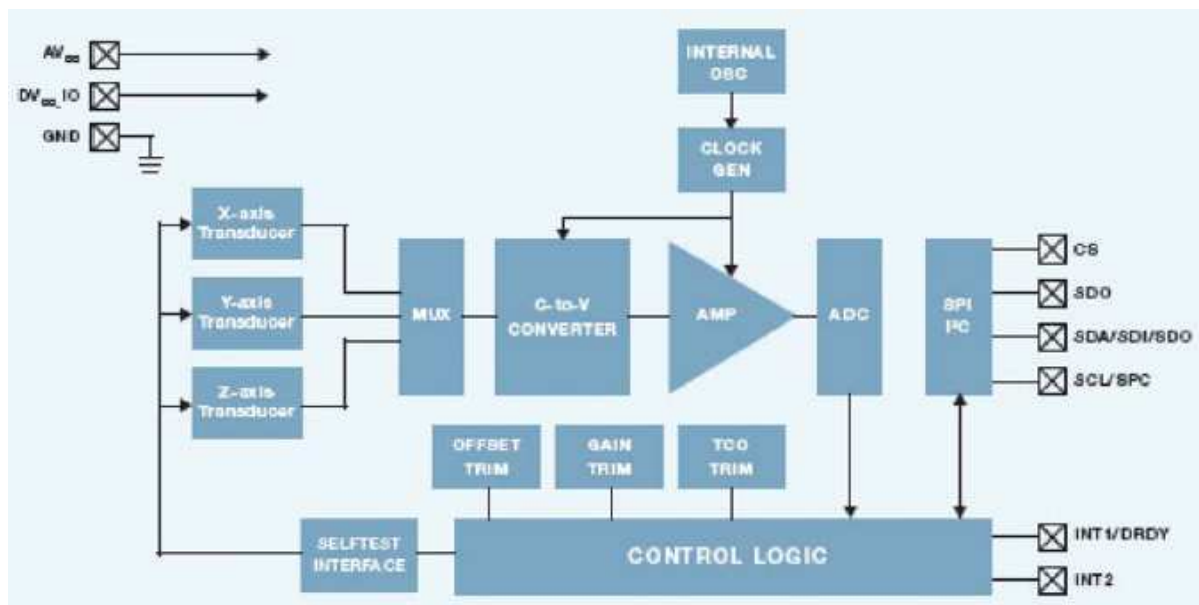
d je velikost vzduchové mezery mezi elektrodami

Kondenzátor má prostřední elektrodu pohyblivou, změna jejího pohybu respektive zrychlení se projeví změnou rozdílu kapacity (Obr. 3.8). Při konstrukci je důležité zajistit lineární a dostatečně citlivý převod zrychlení na mechanický pohyb, který definuje měřící rozsah zrychlení.



Obr. 3.8: Kapacitní snímač[17]

O převod naměřené kapacity na dále zpracovatelný signál se postará ASIC elektronika, která naměřenou změnu kapacity pomocí multiplexoru postupně převádí na hodnoty napětí, které zesílí a následně navzorkuje zabudovaným A/D převodníkem, čímž získáme jejich digitální tvar, který lze posléze přečíst z registru. Pro každou osu je vyhrazen 8bitový registr.

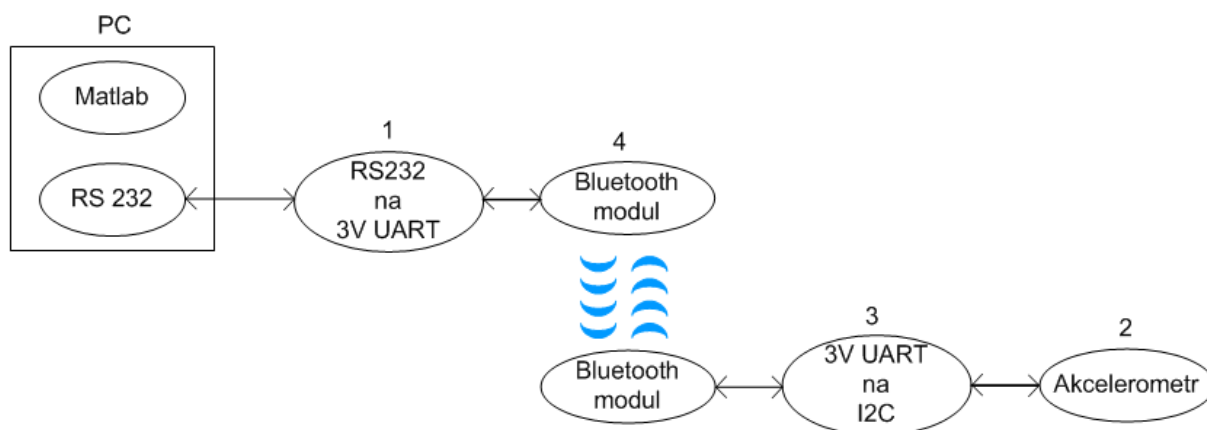


Obr. 3.9: Vnitřní struktura ASIC

[17]

4 Návrh a realizace měřicího řetězce

Měřicí řetězec tohoto zařízení se skládá z počítače, ke kterému je pomocí sériové linky RS232 připojen jeden přípravek obsahující převodník signálu na TTL úroveň a na výstupu převodníku je umístěn bezdrátový bluetooth modul. Na opačném konci řetězce se nachází další přípravek vybaven bluetooth modulem, převodníkem UART na I2C a akcelerometrem. Signály z modulu jsou posílány do převodníku, který má za úkol řídit komunikaci s akcelerometrem po moderní sběrnici I2C.



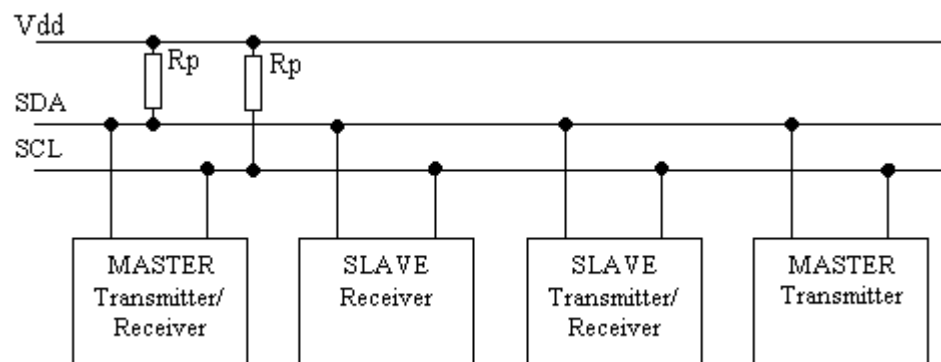
Obr. 4.1: Blokové schéma měřicího řetězce

4.1 Akcelerometr MMA 7455

Pro měření zrychlení a náklonu využívá zařízení kapacitní 3osy akcelerometr firmy Freescale. Jedná se o model MMA 7455. Tento akcelerometr patří mezi tzv. inteligentní snímače, protože má integrovaný jak mechanický tak elektronický subsystém. Výstup dat je digitální a navíc si můžeme zvolit mezi dvěma typy sběrnice, konkrétně SPI nebo I2C. Přepínání režimu sběrnice mezi SPI a I2C je provedeno hardwarově přivedením logické úrovně 1 (0) na pin CS. Vzhledem k volbě sousedního převodníku byla vybrána pro komunikaci s okolím univerzální sběrnice I2C.

4.1.1 Zapojení sběrnice I2C

I2C(Vnitřní integrovaný okruh) je počítačová sériová sběrnice vyvinutá firmou Philips, která umožňuje propojení mezi několika procesory (Masters) a periferními součástkami (Slaves) s pomocí dvou obousměrných vodičů. Sériovým datovým vodičem pro přenos adresy a dat (SDA) a hodinovým vodičem sloužícím k synchronizaci (SCL). Oba vodiče musí být připojeny ke kladnému napětí přes pull-up rezistory, což zajistí vysokou impedanci zařízení v neaktivním stavu, avšak zařízení přitom neustále vyhodnocuje signály na sběrnici.

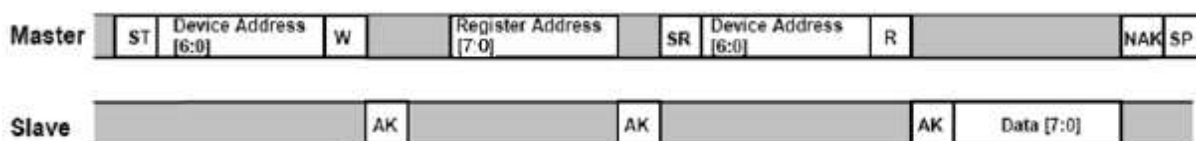


Obr. 4.2: Zapojení sběrnice I2C[20]

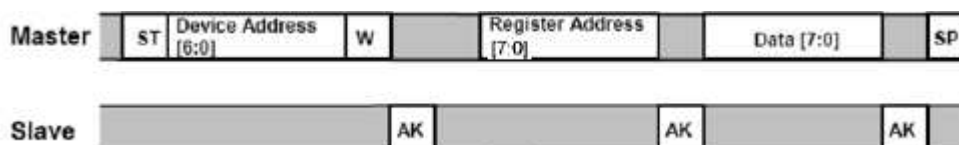
[19][20]

4.1.2 Průběh adresování

Každé připojené zařízení má přidělenou 7 bitovou adresu. Než dojde k navázání komunikace, musí nejdříve zařízení Master poslat na sběrnici počáteční podmínky startu (ST). Potom je poslána adresa příjemce a jeden bit R/W rozhodující o tom, zda budeme data číst nebo zapisovat. Tuto adresu porovnávají ostatní zařízení na sběrnici, pokud je zjištěna shoda, potvrdí přijetí adresy bitem (AK) a komunikace pokračuje. Za každým přeneseným byte následuje potvrzení. Potvrzení zároveň znamená, že se bude přijímat další byte. Požadované ukončení přenosu se ohlásí neexistencí potvrzení (NAK). Na konci přenosu je vyslaná podmínka stop (SP) a následně se sběrnice ocitá v klidovém stavu.



Obr. 4.3: Ukázka načítání jednoho byte

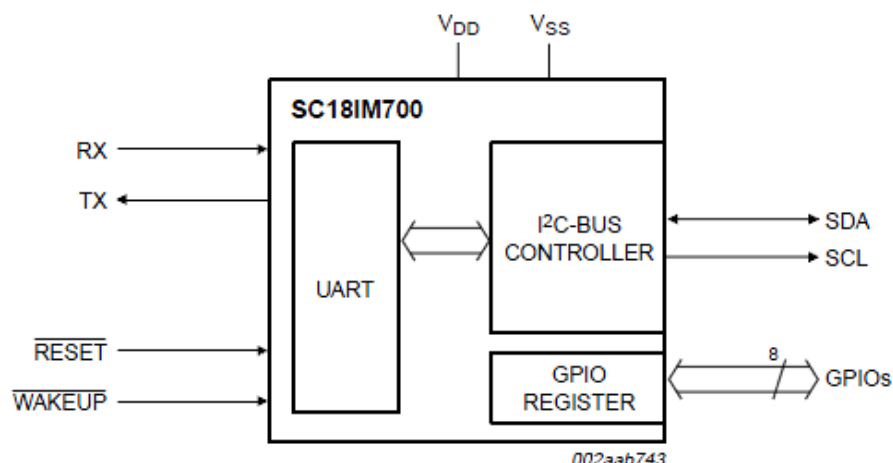


Obr. 4.4: Ukázka zápisu jednoho byte

4.2 Převodník UART na I2C

Jedna možnost zprostředkování komunikace s akcelerometrem jsou uPC, většina z nich je vybavena sběrnici I2C a zároveň UART pro posílání dat do PC. Pokud však potřebujeme rychle a relativně jednoduše číst nebo zapisovat data po sběrnici I2C, nabízí se univerzální převodník UART na I2C.

Převodník pracuje ve 3V TTL standardu. Napájecí napětí převodníku je stejné jako u akcelerometru tedy 3,3V. Defaultní rychlost UART linky je nastavena na 9,6 kbit/s. V případě potřeby lze rychlost zvednout až na 460.8 kbit/s.

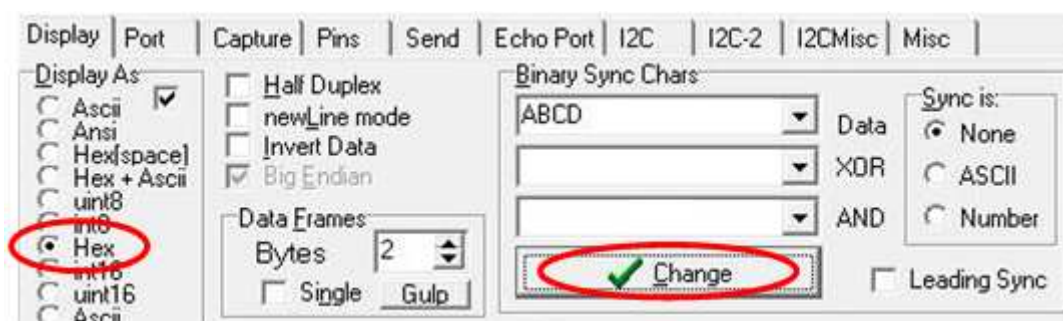


Obr. 4.5: Blokové schéma SC18IM700

Veškeré nastavení převodníku je realizováno pomocí vkládání příkazu v program Realterm pro ovládání sériového portu.

4.2.1 Příklad komunikace

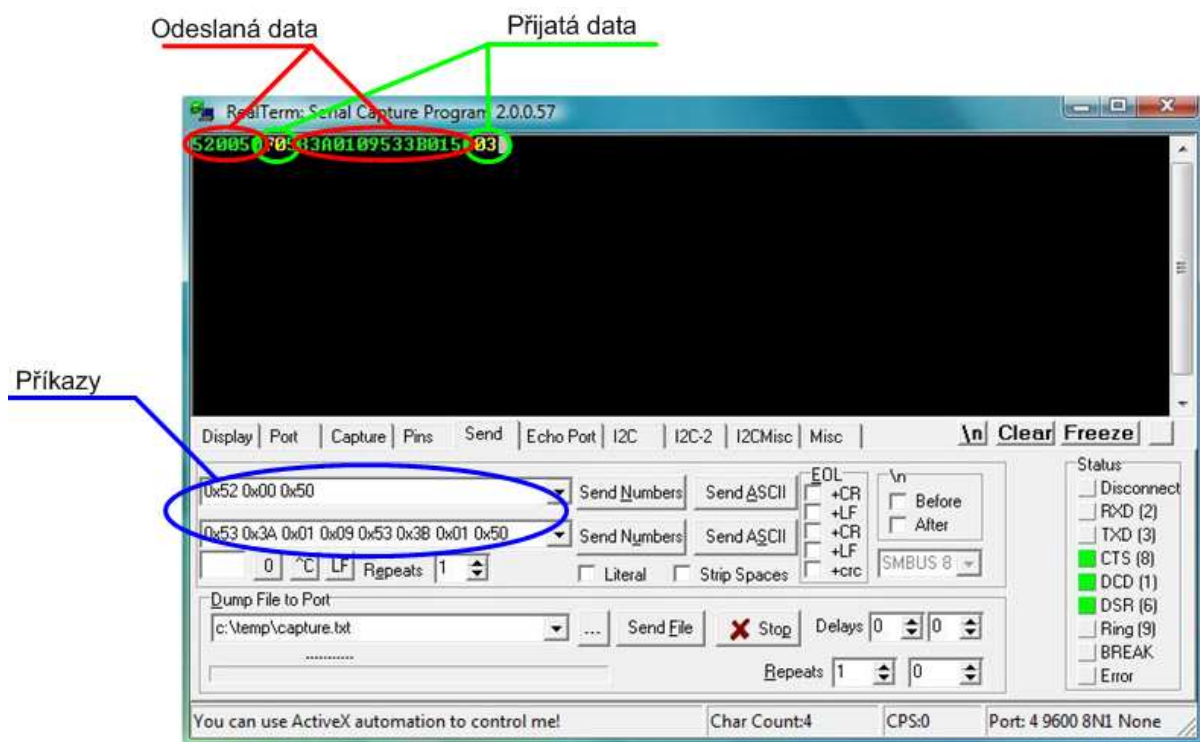
Otevřeme program RealTerm, nastavíme zobrazování hodnot v hexadecimálním formátu a potvrdíme změny kliknutím na tlačítko Change.



Obr. 4.6: Realterm nastavení

Potom rozbalíme záložku Port a zkontrolujeme, zda máme nastavenou správnou rychlost a číslo portu. Klikneme na záložku Send. Do políčka před tlačítkem Send numbers napíšeme příkaz 0x52 0x00 0x50 tzn. načtení registru na adrese 0x00, pokud dostaneme odpověď ve tvaru F0 spojení je v pořádku.

Bezdrátová komunikace je realizována bluetooth moduly firmy Stollman. Moduly jsou k dispozici ve dvou verzích. Verze s označením AI je osazena integrovanou anténkou a verze AP, která se dodává bez anténky. Moduly patří do výkonnostní třídy 2, za ideálních podmínek mají dosah až 50 metrů.



Obr. 4.7: Realterm komunikace s SC18IM700

4.3 Bluetooth modul Bluemod + B20/AI

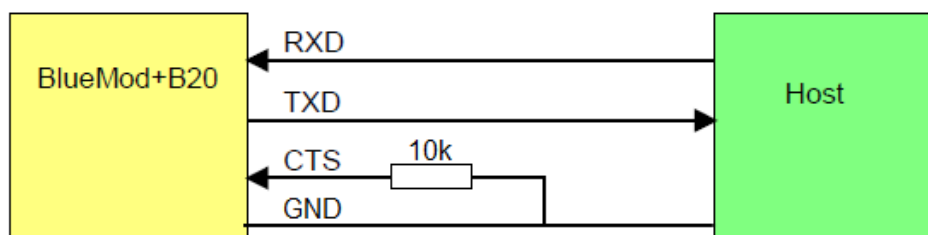


Obr. 4.8: BlueMod+B20/AI

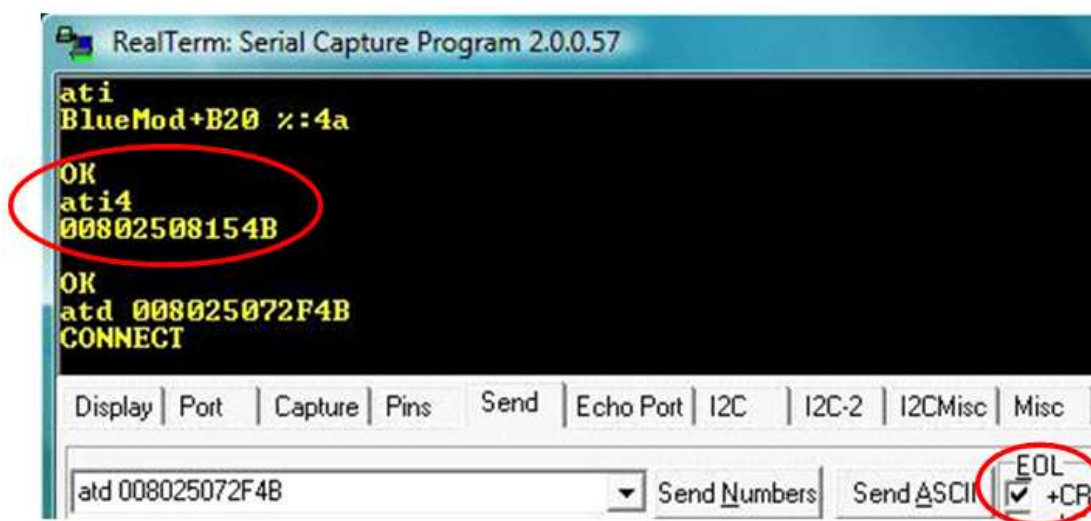
Modul funguje buď v příkazovém, nebo online režimu. Příkazový režim znamená, že bluetooth není momentálně připojen k jakémukoli modulu a přijímá AT příkazy. Jakmile se modul spáruje s jiným modulem, přejde automaticky do online stavu a nereaguje na AT příkazy. Potřebujeme-li přerušit bluetooth komunikaci stačí podržet tlačítko reset po dobu >5ms popřípadě krátkodobě přerušit napájení modulu.

Pro konfigurování modulu, modul nejdříve připojíme k sériové lince PC, tak že zapojíme pouze pin RXD, TXD, GND a CTS přes 10 kΩ na zem. Za sériovou linku připojíme převodník na TTL úroveň a teprve potom modul. Jakmile máme vše zapojeno, otevřeme program RealTerm a zkontrolujeme, zda

je aktivní správný port a odpovídající přenosová rychlost. Změníme zobrazování na ASCII a v záložce Send zaškrtneme +CR. Nastudujeme dokumentaci s AT příkazy. Vyzkoušíme poslat příkaz ati4 měla by se objevit adresa modulu (Obr. 4.10).



Obr. 4.9: 3vodičové zapojení BF modulu



Obr. 4.10: Ukázka komunikace s BF modulem

5 Návrh softwarové aplikace

Aplikace pro ovládání měřícího řetězce je realizována v programovém prostředí Matlab. Pro lepší pochopení algoritmu je uveden vývojový diagram programu.

5.1 Vývojový diagram

Vývojový diagram je symbolický jazyk, který se používá pro názorné zobrazení algoritmu zpracování informací a případnou stručnou publikaci programů. Tento jazyk je tvořen přesně definovanými značkami s jednoznačným významem (sémantikou) a pravidly jak tyto značky ve vzájemné souvislosti používat (syntax).

Jeho používání je vhodné zejména u začínajících programátorů, protože dovoluje názorným způsobem formulovat postup řešení daného úkolu s vyznačením všech jeho možných alternativ. Používá se však i při týmovém řešení problému, kdy slouží jako komunikační prostředek mezi analytiky a programátory. Vývojové diagramy jsou též vhodným prostředkem pro publikaci programů z několika důvodů. Např. je neefektivní publikovat program v některém z programovacích jazyků, každý program je dnes dílem, na který se vztahuje autorský zákon a je tímto zákonem chráněn.

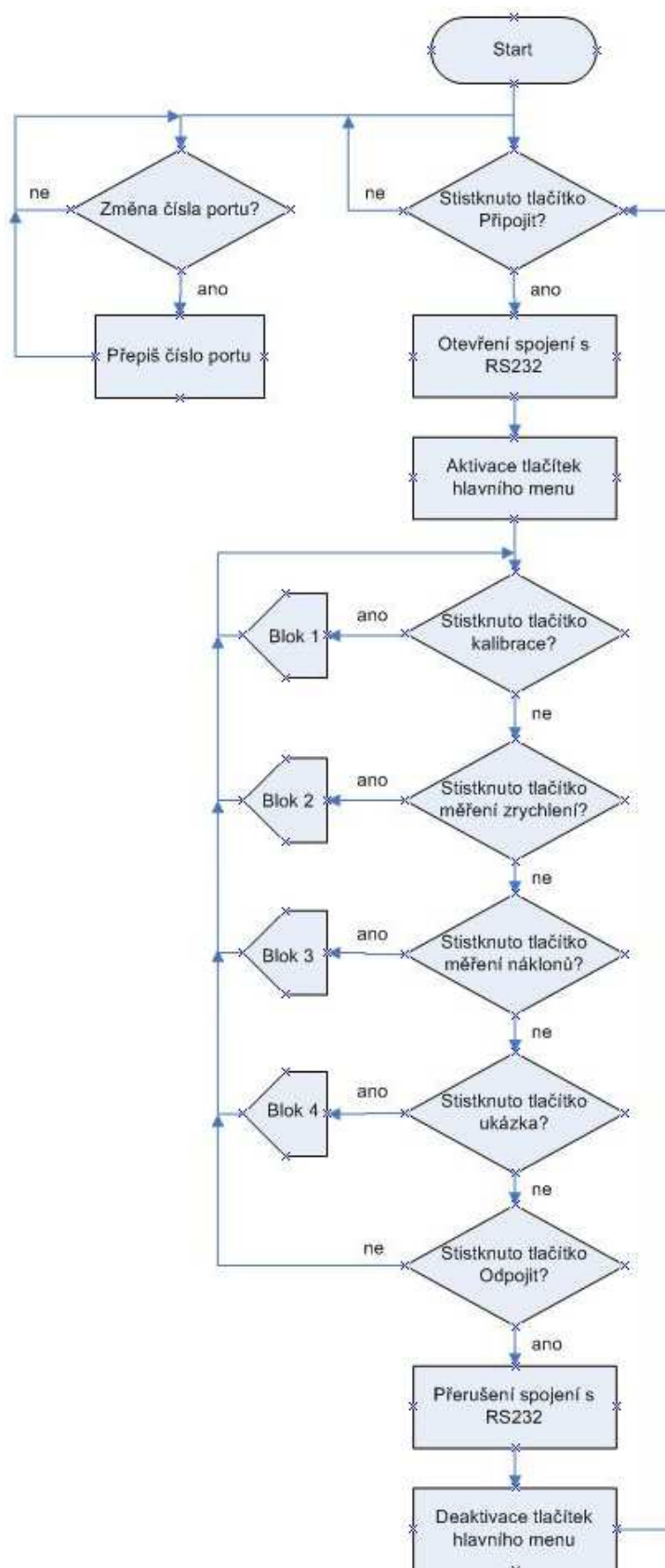
[15]

5.1.1 Symboly vývojového diagramu

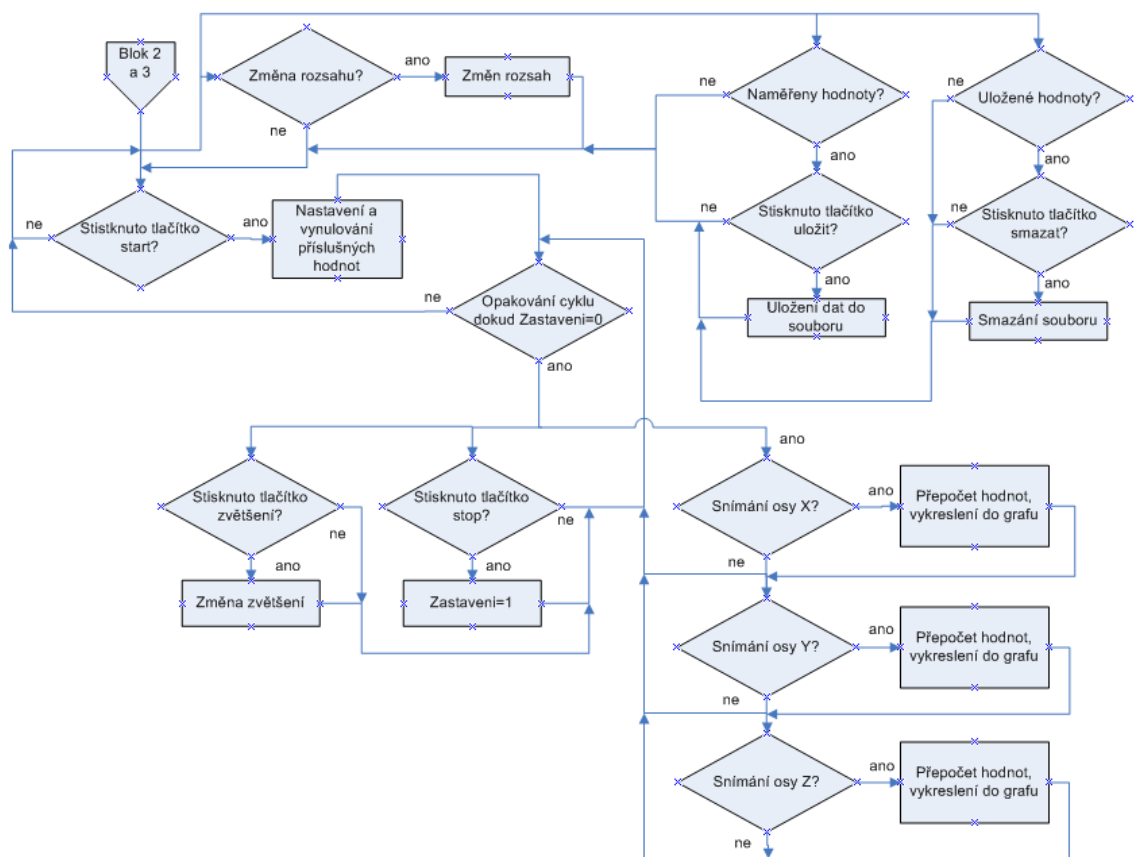
- úsečka či množina navazujících úseček končící šipkou - určuje směr zpracování algoritmu
- obdélník s popisem - definuje dílčí krok zpracování algoritmu
- kosočtverec - větvení postupu v algoritmu v závislosti na splnění podmínky
- obdélník se zaoblenými rohy - počátek nebo ukončení zpracování algoritmu
- kruh - spojka, jednotlivých úseček

[16]

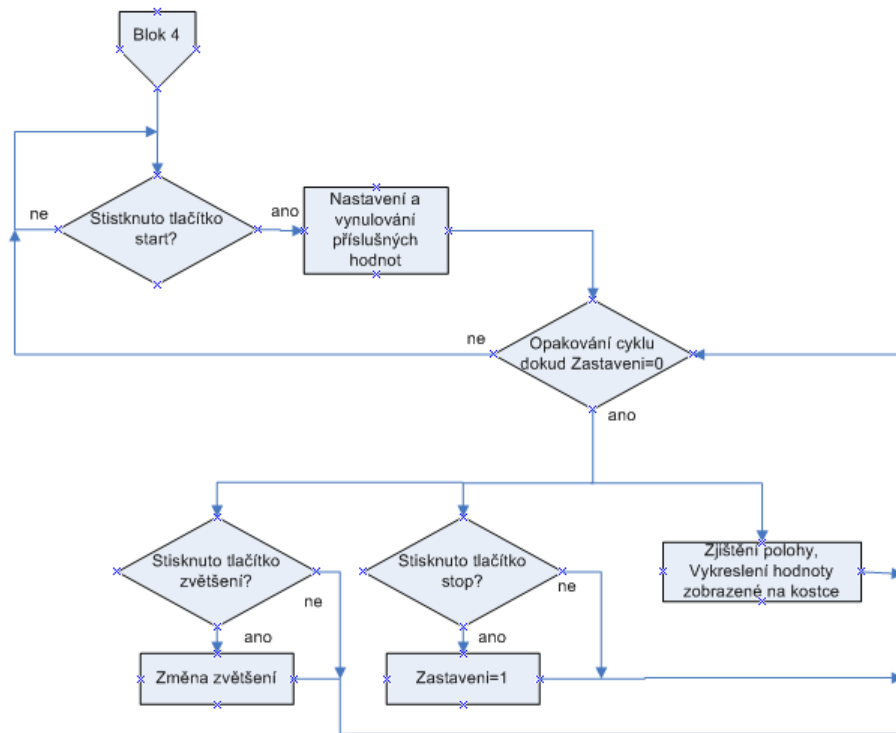
5.1.2 Vývojové diagramy programu



Obr. 5.1: Hlavní vývojový diagram



Obr. 5.3: Popis bloku měření zrychlení a náklonu

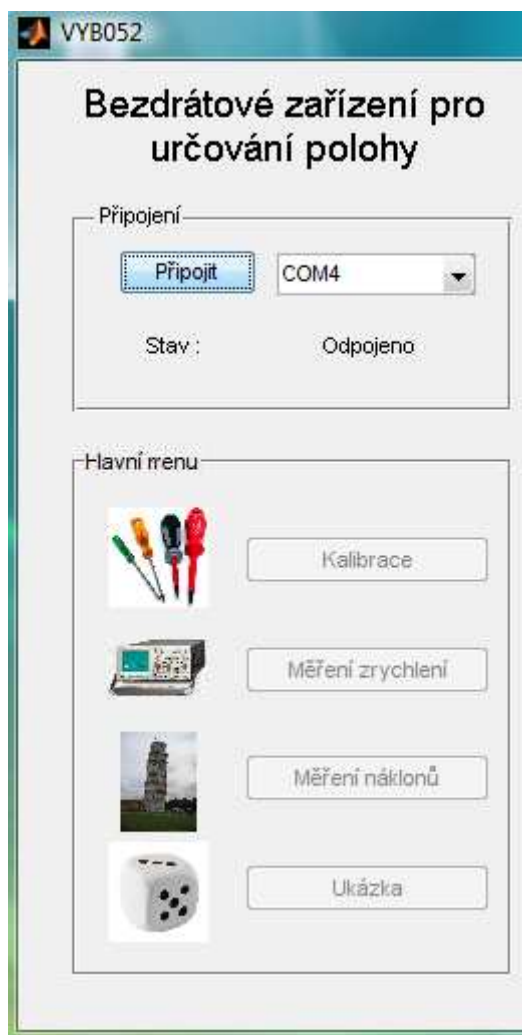


Obr. 5.4: Popis bloku ukázka

5.2 Popis programu

Aplikaci tvoří Windows okno, ve kterém jsou umístěny dva panely.

Panel připojení obsahuje tlačítko sloužící k otevření komunikace po sériové lince, roletkové menu pro výběr příslušného čísla portu a ukazatele aktuálního stavu připojení. Panel hlavní menu nabízí kalibraci, měření zrychlení, měření náklonů a ukázkou hrací kostky pro demonstraci. Nabídka hlavního menu je neaktivní dokud nenavážeme spojení se sériovou linkou.



Obr. 5.5: Program pro měřicí řetězec

Jakmile se připojíme k sériové lince, tlačítka z hlavního menu se stanou opět aktivní. Začneme od shora kliknutím na tlačítko Kalibrace. Vedle menu se objeví další panel nazvaný Ovládání. Panel je vybaven tlačítkem Start a Stop pro ovládání procesu snímání dat, panelem zrychlení kde se zobrazují měřené hodnoty zrychlení a panelem kompenzace, kde se naopak zobrazují hodnoty kompenzace každé osy (Obr. 5.6). Hodnoty zrychlení jsou v programu uváděny jako násobky tíhové zrychlení, tzn., že pokud naměříme hodnotu 1,5g odpovídá zrychlení $1,5 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 14,715 \text{ m/s}^2$.

Ovládání		
<div>Start</div> <div>Stop</div>	<div>Zrychlení</div> <div>osa X : 0 g</div> <div>osa Y : 0 g</div> <div>osa Z : 0 g</div>	<div>Kompensace</div> <div>osa X : 0 g</div> <div>osa Y : 0 g</div> <div>osa Z : 0 g</div>

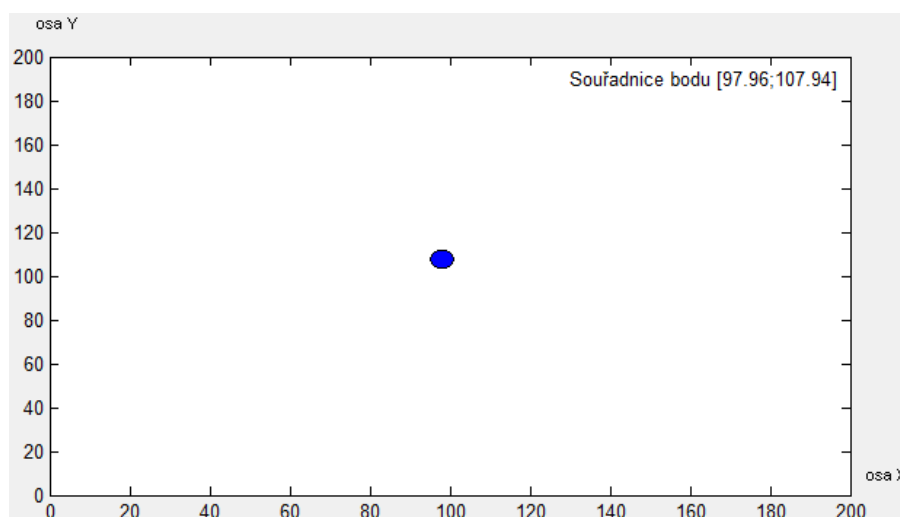
Obr. 5.6: Kalibrace

Akcelerometr se musí pravidelně kalibrovat, protože se mění parametry jeho kapacitních kondenzátorů. Než spustíme kalibraci, umístíme krabičku s akcelerometrem na rovnou plochu. Princip kalibrace spočívá v tom, že je akcelerometr orientován v poloze při, které nesmí působit na osách X a Y zrychlení a na osu Z působí pouze tíhové zrychlení -1g. Tím pádem softwarově vyrovnáváme odchylku od těchto hodnot. Kalibrace trvá, dokud se hodnoty zrychlení nestabilizují, přibližně 30 sekund.

Ovládání		
<div>Start</div> <div>Další</div> <div>Stop</div>	<div>Zrychlení</div> <div>osa X : -0.01 g</div> <div>osa Y : 0.02 g</div> <div>osa Z : -0.98 g</div>	<div>Kompensace</div> <div>osa X : 0.19 g</div> <div>osa Y : 0.04 g</div> <div>osa Z : 0.33 g</div>

Obr. 5.7: Kalibrace ustálení

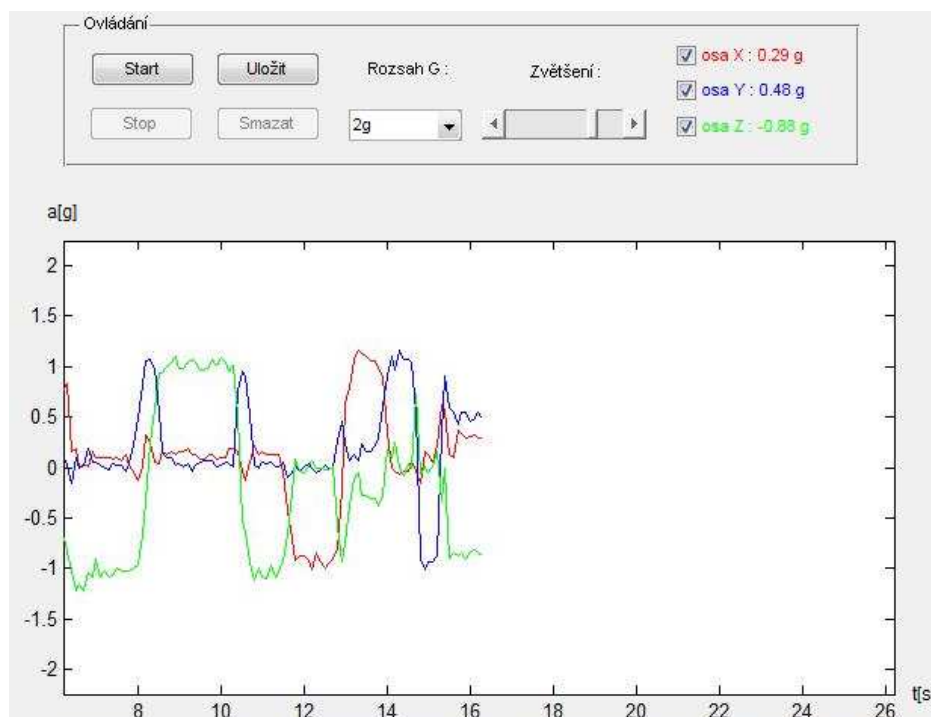
Když hodnoty kompenzace jen mírně kolísají, je kalibrace hotova, klikneme na tlačítko Další. Objeví se nám graf s modrým bodem uprostřed, který mění svou polohu v závislosti na natočení akcelerometru. Souřadnice bodu jsou vypisovány v pravém horním rohu grafu.



Obr. 5.8: Pohyb bodu

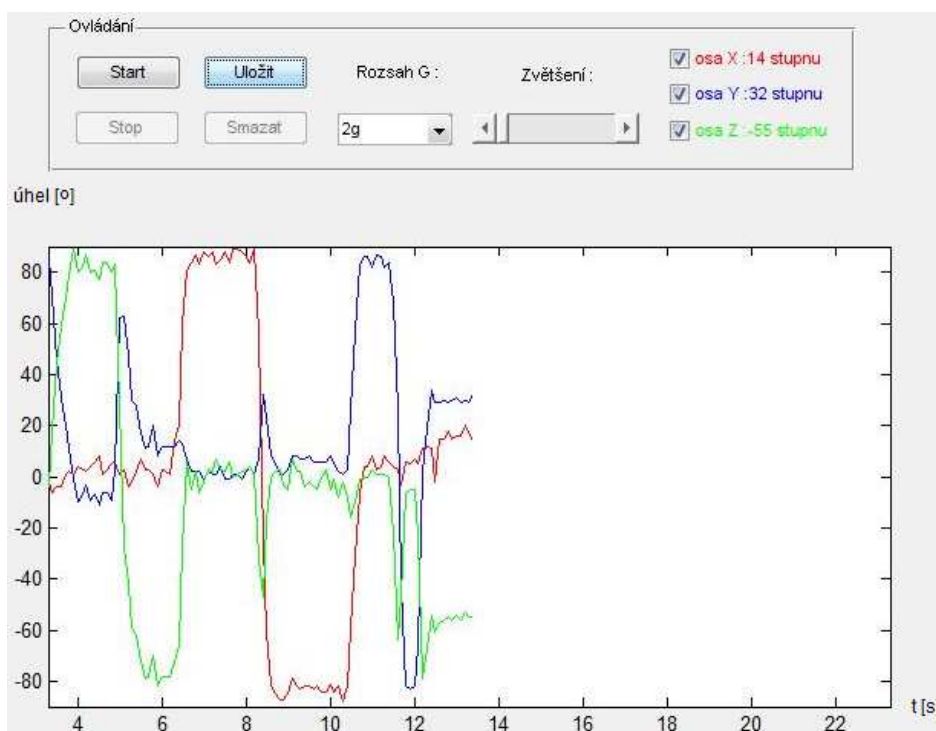
Pokud vybere z nabídky Hlavní menu měření zrychlení, zobrazí se nám panel ovládání s ovládacími prvky a graf, do kterého jsou vykreslovány naměřené hodnoty. Pomocí tlačítka Start spustíme měření, ale nejdříve označíme měřené osy, každá osa je odlišena barevně. Tlačítkem Stop můžeme měření kdykoliv zastavit. Po skončení měření lze hodnoty zálohovat tlačítkem Uložit nebo odstranit tlačítkem

Smazat. Roletkovým menu přepínáme rozsah měřeného zrychlení od 2g až do 8g. Posuvník Zvětšení slouží k přiblížení grafu.



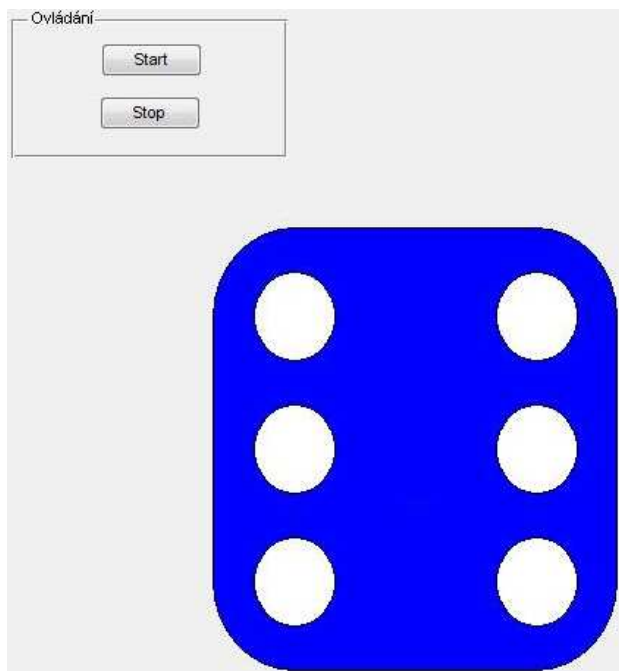
Obr. 5.9: Měření zrychlení

Další možnost je měření náklonu. Měření náklonu má praktický totožné ovládání jako měření zrychlení.



Obr. 5.20: Měření náklonu

Poslední tlačítko s názvem Ukázka demonstruje monitorování polohy kostky. Tlačítkem Start spustíme monitorování. Tlačítkem Stop monitorování přerušíme. Hodnota čísla padnouceho na kostce se zobrazuje na displeji.

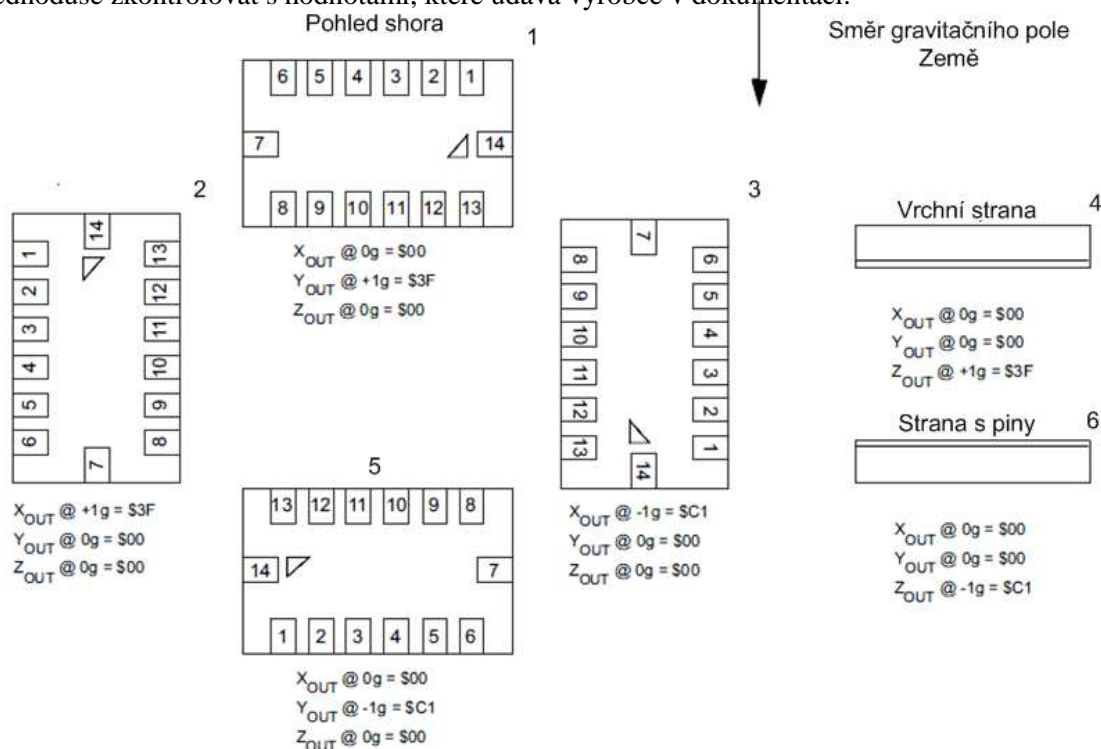


Obr. 5.11: Monitorování polohy kostky

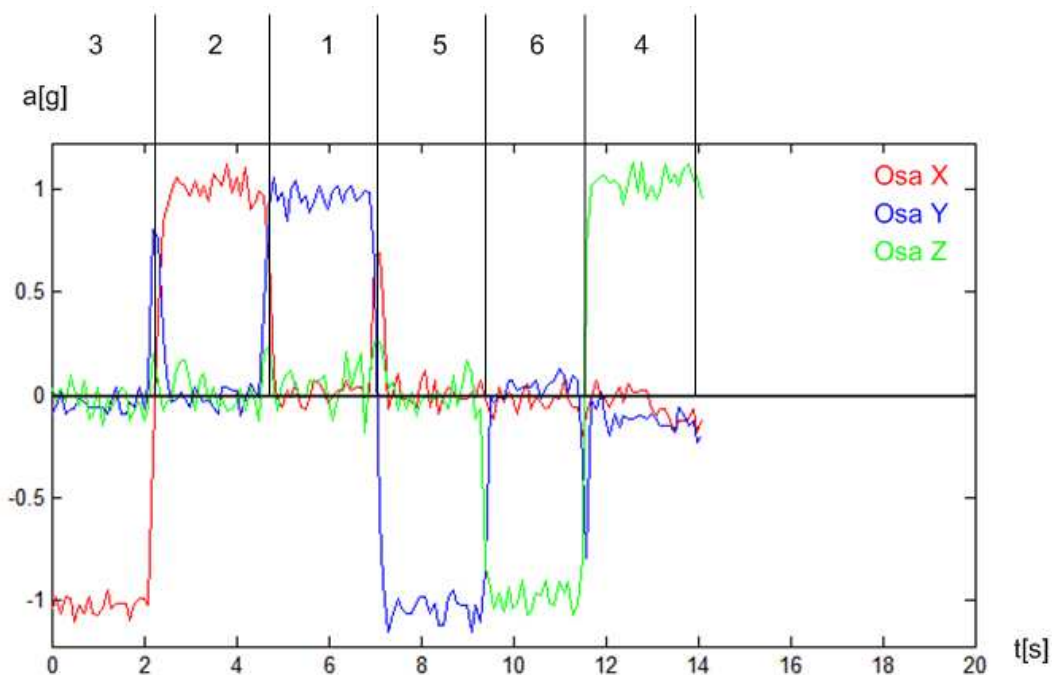
6 Testování

Na začátku testování musíme akcelerometr bezdrátově spojit a nakalibrovat. Postup navázání bezdrátové komunikace a kalibrace je popsána v předchozích kapitolách.

Jakmile máme vše připraveno pro měření, změříme nejdříve statické zrychlení, které můžeme jednoduše zkontrolovat s hodnotami, které udává výrobce v dokumentaci.



Obr. 6.1: Natočení akcelerometru a výstupní odezva v 2g modu

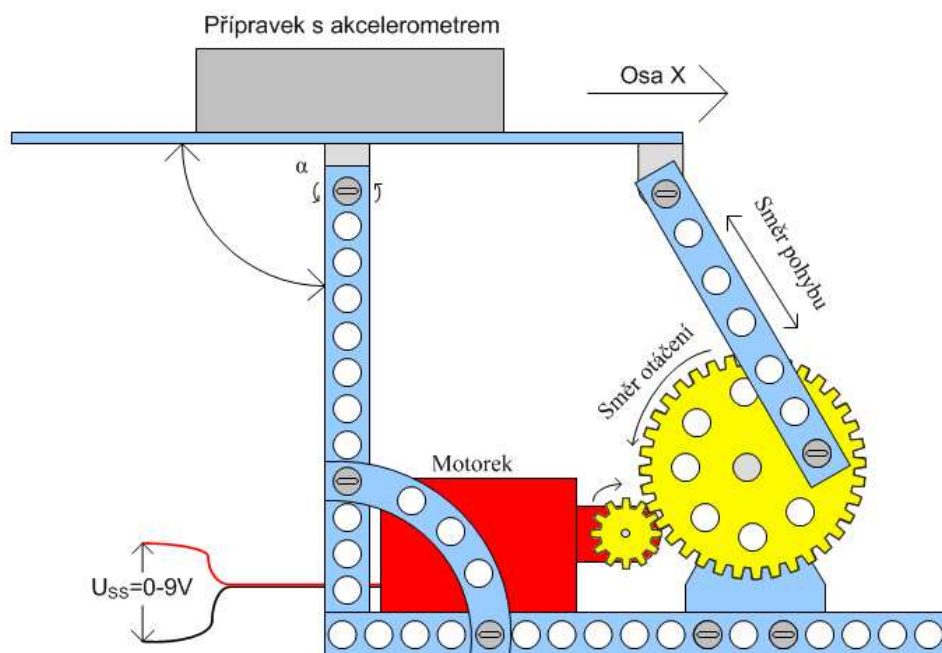


Obr. 6.2: Naměřené výsledky natočení akcelerometru v 2g modu

Během měření statického zrychlení postupně vystřídáme všechny polohy natočení akcelerometru, přičemž v každé poloze ponecháme akcelerometr na okamžik v klidu.

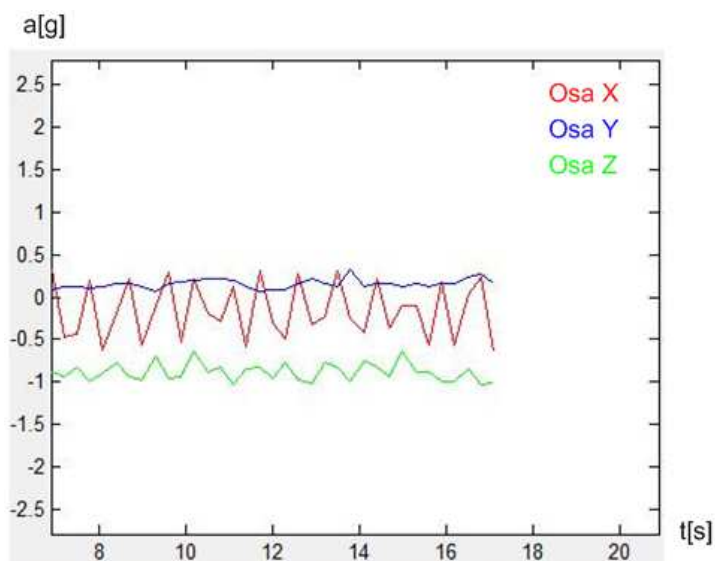
Jak je vidět na Obr. 6.2, hodnoty zrychlení v jednotlivých osách odpovídají hodnotám výrobce. Drobné zašumění hodnot vzniká, protože akcelerometr nedokáže odlišit statické zrychlení od dynamického.

Během dalšího testu, připevníme akcelerometr k simulátoru pohybu a provedeme měření změny zrychlení a náklonu.

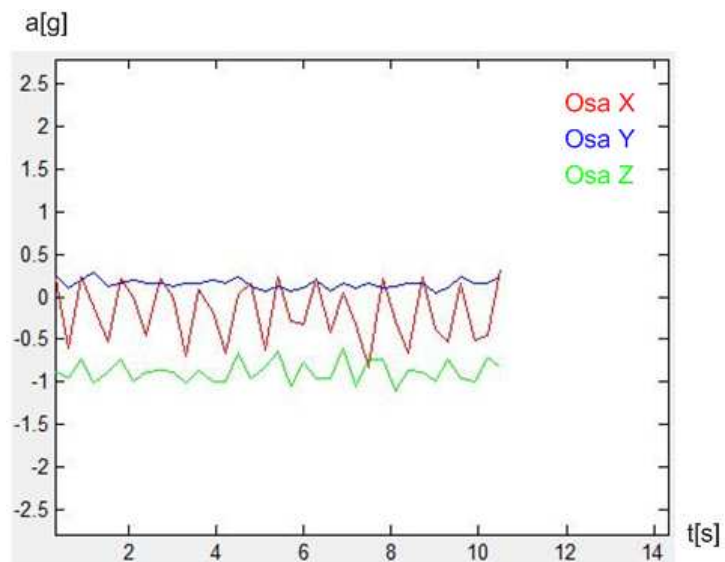


Obr. 6.3: Simulátor pohybu

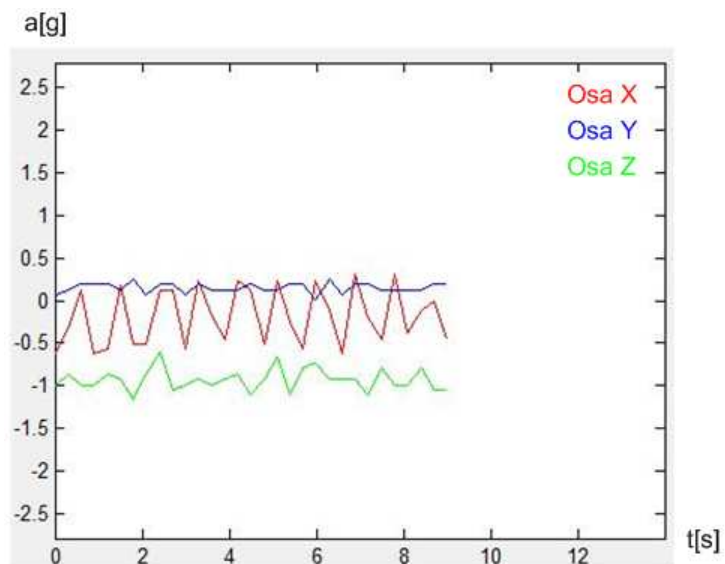
Pro měření nastavíme napájecí napětí simulátoru pohybu na 2V a naměříme zrychlení pro 2,4,8g.



Obr. 6.4: Měření zrychlení 2g modu



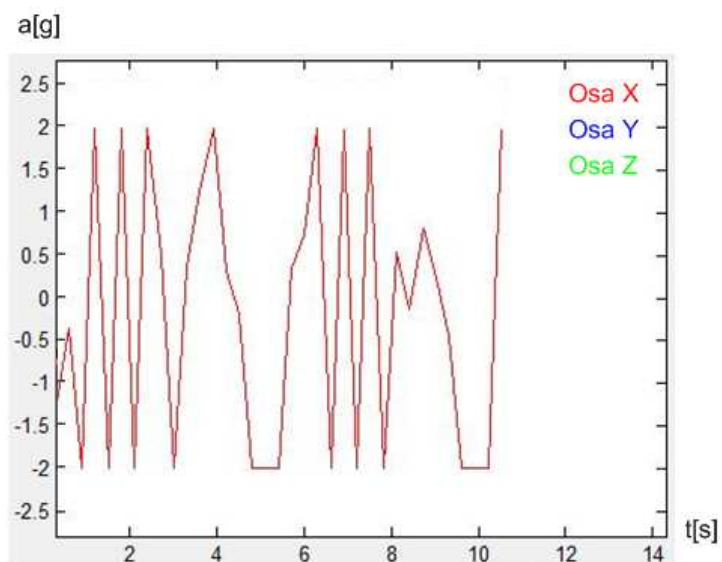
Obr. 6.5: Měření zrychlení 4g modu



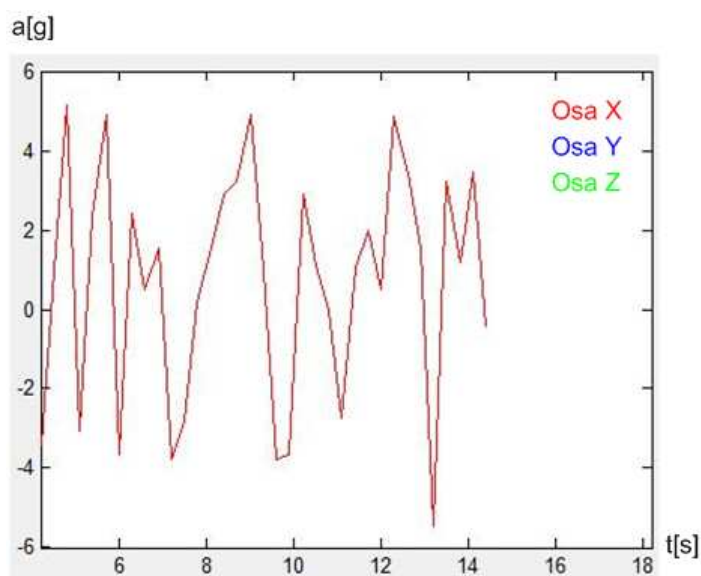
Obr. 6.6: Měření zrychlení 8g modu

V ideálním případě bychom měli v každém grafu získat na ose X sinusový průběh. Kmitání simulátoru pohybu ovlivňuje také zrychlení na ose Z. Naproti tomu osa Y, není ve směru pohybu, tak že její zrychlení se nemění. Sinusový průběh osy X je zkreslený, protože měřící řetězec neumí dostatečně plynule číst hodnoty zrychlení.

Pro test rozsahu akcelerometru nastavíme napájecí napětí simulátoru na 8V a provedeme změření pro režim 2 a 8g.



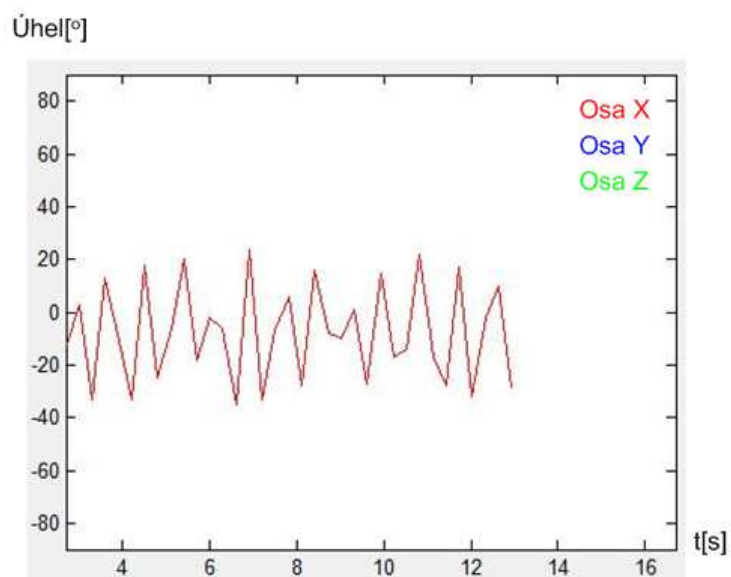
Obr. 6.7: Měření zrychlení na ose X v 2 g modu



Obr. 6.8: Měření zrychlení na ose X v 8 g modu

Hodnoty zrychlení se v akcelerometru ukládají do 8 bitových registrů, tzn. že pro rozsah 2g je citlivost akcelerometru $4(-2g \text{ až } +2g)/256=0,015625g$. Pro rozsah 8g to bude $16/256=0,0625g$. Z toho vyplývá, že měření s rozsahem 2g je přesnější ale za cenu menšího rozsahu. Na Obr. 6. 4-6 není rozdíl v použitém rozsahu patrný, protože výsledky měření jsou softwarově zaokrouhlovány. Na Obr. 6.7-8 můžeme pozorovat, že hodnoty zrychlení osy X, které překročili měřící rozsah, jsou ořezány, což zkresluje výsledky měření. Zatímco v 8g režimu je pro jejich měření rozsah dostačující.

Nakonec vyzkoušíme měření náklonu na simulátoru pohybu. Nastavíme rozsah 2g a napájecí napětí simulátoru na 2V.



Obr. 6.8: Měření náklonu na ose X v 2 g modu

Pro určení náklonu nejprve vypočteme vektor gravitační síly $g_m = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$. V následujících výpočtech se vypočítává poměr mezi zrychlením v dané ose a vektorem gravitační síly, tak že není potřeba údaje z akcelerometru přepočítávat na skutečnou velikost zrychlení. Výsledek ve stupních získáme goniometrickou funkcí. $Náklon = \arcsin \frac{a_x}{g_m} \cdot \frac{180}{\pi} [^\circ]$.

Nakonec otestujeme dosah. Spustíme si měření zrychlení, jakmile se přestanou zobrazovat hodnoty, odhadneme vzdálenost od PC. Změřená vzdálenost je 32 metrů.

7 Závěr

V práci se podařilo navrhnout a realizovat bezdrátové zařízení pro určování polohy. Zařízení obsahuje 2 přípravky. Přípravek pro bezdrátový přenos dat do PC a přípravek se senzorem. Vhodné součástky byly vybrány na základě požadavku na velký dosah, přijatelnou velikost a vydrž za provozu. Komunikace zařízení s PC byla realizována pomocí bluetooth modulu. Pro jednoduchou obsluhu zařízení, byla naprogramována aplikace v programovém prostředí Matlab. Celé zařízení bylo umístěno na dvou jednovrstvých DPS.

Kromě zařízení byl sestaven simulátor pohybu vykonávající periodicky kmitavý pohyb, který byl určen pro otestování funkčnosti zařízení. Pro demonstraci polohy akcelerometru byl vytvořen podprogram aplikace pro obsluhu zařízení s názvem ukázka, v kterém reprezentuje polohu akcelerometru číslo na hrací kostce, která se zobrazuje se na monitoru.

Během testování zařízení byl zjištěn neduh zařízení, spočívající v nedostatečné plynulosti načítání dat. Tento problém by bylo možné odstranit nahrazením uPC, který by komunikaci s PC zprostředkoval efektivněji a navíc by zařízení mohlo obsahovat LCD display pro zobrazování hodnot nezávisle na PC. Na základě tohoto testování byla sestavena laboratorní úloha, která má za cíl prohloubit znalosti studentů.

Citace literatury

- [1] ČERNÝ, M.- PENHAKER, M. Biotelemetrie přednášky, VŠB TU Ostrava 2007 ISBN: 978-80-248-1605-0.
- [2] VLČEK, Jiří. Přenos dat [online]. poslední revize 18.8.2008. Dostupné z: < http://www.tzb-info.cz/download.py?file=docu/texty/0001/000102_mereni_a_sber_dat_pomoci_pc.pdf>
- [3] WIKIPEDIA. TTL logika [online]. poslední revize 5.3.2010. Dostupné z: < [http://cs.wikipedia.org/wiki/TTL_\(logika\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/TTL_(logika)) >
- [4] WIKIPEDIA. Zrychlení [online]. poslední revize 5.3.2010. Dostupné z: < <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zrychlen%C3%AD>>
- [5] WIKIPEDIA. Gravitační zrychlení [online]. poslední revize 5.3.2010. Dostupné z: < http://cs.wikipedia.org/wiki/Gravita%C4%8Dn%C3%AD_zrychlen%C3%AD>
- [6] WIKIPEDIA. Tíhové zrychlení [online]. poslední revize 5.3.2010. Dostupné z: < http://cs.wikipedia.org/wiki/T%C3%ADhov%C3%A9_zrychlen%C3%AD>
- [7] WIKIPEDIA. Odstředivá síla [online]. poslední revize 5.3.2010. Dostupné z: < http://cs.wikipedia.org/wiki/Odst%C5%99ediv%C3%A9_zrychlen%C3%AD>
- [8] VAŠKO, Ondřej. Zpracování výstupního signálu akcelerometru a přenos dat do PC. Praha, 2007. 48 s. Bakalářská práce na ČVUT PRAHA na katedře měření. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Roháč, PhD.
- [9] OLMR, Vít. Sériová linka RS232 [online]. poslední revize 12.12.2005. Dostupné z: < <http://hw.cz/rs-232>>
- [10] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - 1. díl - Piezoelektrické [Online]. poslední revize 14.1.2007. Dostupné z: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART303-principy-akcelerometru--1-dil--piezoelektricke.html>>
- [11] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - 2. díl - Piezorezistivní [Online]. poslední revize 26.1.2007. Dostupné z: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART306-principy-akcelerometru--2-dil--piezorezistivni.html>>
- [12] VOJÁČEK, Antonín. Principy akcelerometrů - 3. díl - Tepelné akcelerometry MESIC [Online]. poslední revize 9.4.2007. Dostupné z: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART323-principy-akcelerometru--3-dil--tepelne-akcelerometry-memic.html>>.
- [13] VOJÁČEK, Antonín. MEMS - Co je to a jak to vypadá? [Online]. poslední revize 19.11.2006. Dostupné z: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART289-mems--dil-1--co-to-je-a-jak-to-vypada-.html>>
- [14] DIDELES, Myra. Bluetooth: Technický přehled [online]. poslední revize 2008. Dostupné z: < <http://www.acm.org/crossroads/xrds9-4/blue.html>>
- [15] LÉVAY, Radek. Vývojové diagramy [online]. poslední revize 9.1.2001. Dostupné z: < <http://www.ikvalita.cz/download/kap2.pdf>>

- [16] WIKIPEDIA. Vývojové diagramy [online]. poslední revize 5.3.2001. Dostupné z: < http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDvojov%C3%BD_diagram>
- [17] VOJÁČEK, Antonín. Jak pracují nové 3D MEMS akcelerometry Freescale ? [Online]. poslední revize 30.4.2007. Dostupné z: < <http://hw.cz/Produkty/Nove-soucastky/ART1875-Jak-pracuji-nove-3D-MEMS-akcelerometry-Freescale-.html>>
- [18] FAMFULÍK, Lukáš. Digitální vodováha [Online]. poslední revize 15.6.2009. Dostupné z: < <http://hw.cz/teorieapraxe/konstrukce/art2867-digitalni-vodovaha.html> >
- [19] WIKIPEDIA. I2C [Online]. Dostupné z: < <http://cs.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>>
- [20] HANKOVEC, David. Sběrnice I2C [Online]. Dostupné z: < <http://www.dhservis.cz/iic.htm> >